Committente:

FINCANTIERI S.p.A. - Divisione Navi Militari

Oggetto:

Stabilimento di Riva Trigoso - Comune di Sestri Levante (GE)

MESSA IN SICUREZZA DEL FRONTE MARE DELLO STABILIMENTO NELL'AREA COMPRESA TRA IL PIANO DI VARO ESISTENTE E LE CAPANNETTE MOBILI

STUDIO PRELIMINARE AMBIENTALE

Titolo elaborato:

ATTIVITA' DI STUDIO E MODELLAZIONE NUMERICA A SUPPORTO DELL'ITER AUTORIZZATIVO (redatto da DHI S.r.l.)

Coordinamento dello Studio Preliminare Ambientale:

INGE PRO Ingegneri Associati

Corso Torino 17/6 sc.A - 16129 Genova
Tel. 010.5740568 - fax : 010.4211059
e-mail: studio@ingepro.eu - PEC: studio@pec.ingepro.eu
C.F. e P. IVA: 02726060995

Ing. Riccardo Giammarini

Firmato digitalmente da
Riccardo Giammarini
CN = Giammarini Riccardo
O = Ordine degli Ingegneri della Provincia di Genova
T = Ingegnere

Progettazione architettonica e strutturale

FINCANTIERI SI

Fincantieri SI S.p.A.
Industrial Systems Engineering
SI-ISD - Industrial System Design
Via delle Industrie, 17|A - 30175 Marghera (VE)

Ing. Elena Marcato
Head of Industrial System Design

Firmato digitalmente da: Elena Marcato
Limitazioni d'uso: Explicit Text: Certificate issued through Sistema Pubblico di Identità Digitale (SPID) digital identity, not usable to require other SPID digital identity
Data: 02/05/2022 17:29:42

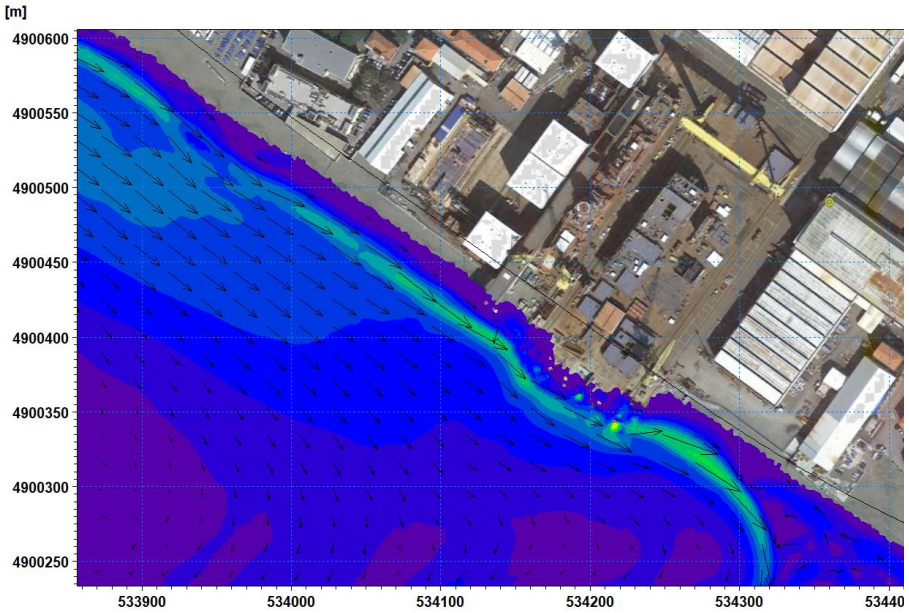
Revisione	Data	Redatto da:	Verificato da:	Approvato da:	Descrizione
0	aprile 2022				Emissione

Nome file:	Scala:	Commessa:	Livello prog:	Elaborato:
P008.SA.R04.00_Studio-modellazione-numerica		P008	SA	R04

Messa in sicurezza del fronte verso mare dello Stabilimento Fincantieri di Riva Trigoso (GE) nell'area compresa fra il piano di varo esistente e le capannette mobili

Attività di studio e modellazione numerica a supporto dell'iter autorizzativo

Relazione tecnica



This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)



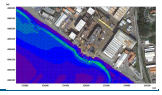
Messa in sicurezza del fronte verso mare dello Stabilimento Fincantieri di Riva Trigoso (GE) nell'area compresa fra il piano di varo esistente e le capannette mobili

Attività di studio e modellazione numerica a supporto della progettazione

Relazione tecnica

Committente Fincantieri SI

Referenti del Committente ing. Elena Marcato, ing. Alessio Rossato



Esempio di distribuzioni delle correnti nel sito di studio

Project manager	Silvia Torretta
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Autore	Silvia Torretta

Codice progetto - elaborato	22803537-01-00100
Data di approvazione	25.02.2022
Emissione	1.0
Classificazione	Ristretta

DHI S.r.l. a socio unico• Via Bombrini 11/12• 10149 Genova• Italy•
Telefono: +39 010 8481220 • dhi-italia@dhigroup.com • www.dhigroup.com

INDICE

1 Premessa 1

2 Inquadramento del sito 1

3 Dati disponibili 2
3.1 Dati meteomarini 2
3.1.1 Dati di vento 5
3.1.2 Dati di moto ondoso 8
3.2 Dati di livello della superficie marina 11
3.3 Dati batimetrici 12
3.4 Caratteristiche dei sedimenti 13

4 Propagazione delle onde dal largo a costa 17
4.1 Condizioni d'onda 17
4.2 Batimetria e dominio di calcolo 17
4.3 Risultati del modello di propagazione del moto ondoso largo-costa 19

5 Analisi statistica degli eventi estremi sottocosta 23
5.1 Altezza d'onda significativa 23
5.2 Livello marino 26

6 Simulazione delle dinamiche costiere 28
6.1 Dominio di calcolo, batimetria 28
6.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative 30
6.3 Risultati del modello integrato onda-corrente nello stato attuale 31
6.3.1 Risultati del modello d'onda di dettaglio – stato attuale 32
6.3.2 Risultati del modello idrodinamico – stato attuale 36
6.4 Risultati del modello integrato onda-corrente nella configurazione progettuale 40
6.4.1 Risultati del modello d'onda di dettaglio – configurazione di progetto 41
6.4.2 Risultati del modello idrodinamico – configurazione di progetto 44

7 Analisi del trasporto litoraneo 46
7.1 Impostazione del modello LITDRIFT 46
7.2 Calcolo del trasporto di sedimenti 49

8 Analisi dell'evoluzione della linea di riva 52
8.1 Implementazione e calibrazione del modello LITLINE 53
8.2 Calibrazione del modello di evoluzione della linea di riva 53
8.3 Evoluzione della linea di riva nella configurazione di stato attuale 54
8.4 Evoluzione della linea di riva nelle configurazioni di progetto 55

9 Sintesi dello studio e conclusioni 57

10 Riferimenti 58

ALLEGATI

ALLEGATO A – Mediterranean Wind Wave Model
Descrizione tecnica

ALLEGATO B – MIKE 21 Spectral Waves (SW)
Descrizione tecnica

ALLEGATO C – MIKE 21 Hydrodynamics (HD)
Descrizione tecnica

ALLEGATO D – Littoral Process (LitDrift e Litline)
Descrizione tecnica

1 Premessa

Oggetto del presente studio sono le attività di modellazione numerica a supporto dell'iter autorizzativo per la realizzazione di un nuovo pontile necessario a sviluppare una nuova linea di varo dello stabilimento Fincantieri di Riva Trigoso (GE).

L'intervento in progetto dovrebbe essere sviluppato a lato del pontile esistente, replicandone caratteristiche sia strutturali che estetiche, e dovrebbe svilupparsi in tre stralci esecutivi.

Le attività modellistiche sono state affrontate utilizzando i software sviluppati da DHI, ed in particolare il modello di trasporto solido litoraneo LITDRIFT (monodimensionale), del pacchetto LITPACK, ed i moduli MIKE 21 SW – *Spectral Waves* e MIKE 21 HD – *Hydrodynamics* (bidimensionali) e LITLINE (monodimensionale) per lo studio rispettivamente dei campi d'onda, dell'idrodinamica locale e della tendenza evolutiva del litorale in studio.

Per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito di studio si è fatto riferimento al database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), un complesso dataset di vento ed onda ad elevata risoluzione disponibile sull'intero bacino del Mar Mediterraneo, prodotto da DHI in collaborazione con HyMO*Lab* (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell''Università di Trieste.

La serie storica di 42 anni di dati di moto ondoso al largo, ricavata dal database MWM, è stata utilizzata come condizione al contorno di un modello dedicato, predisposto con lo scopo di propagare il moto ondoso fino a costa, tenendo conto delle principali trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione verso riva (rifrazione, shoaling, attrito col fondo, frangimento, diffrazione e riflessione).

I dati di onda propagati sottocosta, analizzati in alcuni punti significativi per il litorale di Riva Trigoso, unitamente all'analisi dei dati sedimentologici disponibili, hanno permesso di stimare il trasporto litoraneo con particolare riferimento alle direzioni del trasporto prevalente, individuarne un eventuale trend, ed identificare la profondità di chiusura del sistema, ossia la profondità oltre la quale il trasporto di sedimenti si può considerare trascurabile.

Sulla base dei risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale di moto ondoso, sono stati inoltre selezionati alcuni eventi rappresentativi, in termini di altezza d'onda significativa e direzione media di propagazione, finalizzati a ricostruire con elevato dettaglio le correnti litoranee tipiche dell'area. Questo modello bidimensionale combinato onde-correnti, predisposto sia per la configurazione attuale che per la configurazione di progetto, ha permesso di interpretare le dinamiche di trasporto sedimentario e le variazioni localizzate in corrispondenza del cantiere.

A completamento dell'analisi è stata simulata l'evoluzione della linea di riva a ponente e levante dello stabilimento Fincantieri, nella configurazione di stato attuale e di progetto.

A seguire si riportano in dettaglio i dati utilizzati, la metodologia adottata, la descrizione delle impostazioni dei modelli numerici ed i risultati ottenuti.

2 Inquadramento del sito

Lo stabilimento Fincantieri interessato dall'intervento di costruzione del nuovo pontile è ubicato a Riva Trigoso (GE).

L'unità fisiografica di Riva Trigoso è costituita da una baia racchiusa tra i due promontori di punta Manara a Nord-Ovest e punta Baffe a Sud-Est, al cui centro si estende l'ampia spiaggia sabbiosa. Lo sviluppo della linea di costa all'interno della baia è di circa 5.3 km così articolati:

- 1.5 km di costa alta tra punta Manara e Riva Trigoso ponente, con andamento SW-NE;
- 1.5 km di spiaggia sabbiosa pressoché rettilinea orientata NW-SE, che costituisce la cella litorale di Riva Trigoso;
- 0.3 km di spiaggia di ciottoli grossolani a guisa di tombolo a ridosso dello scoglio dell'Asseu;
- 2 km di costa alta fino a punta Baffe con andamento NNW-SSE.

L'unico bacino significativo afferente l'unità fisiografica è quello del torrente Petronio, che ha una superficie di circa 60 km^2, e che costituisce la principale fonte di alimentazione naturale della spiaggia.

Il cantiere navale di Fincantieri, oggetto dell'intervento in progetto, è uno dei maggiori e più antichi cantieri italiani (fondato nell'agosto del 1897) ed è ubicato nella porzione orientale della spiaggia di Riva Trigoso.

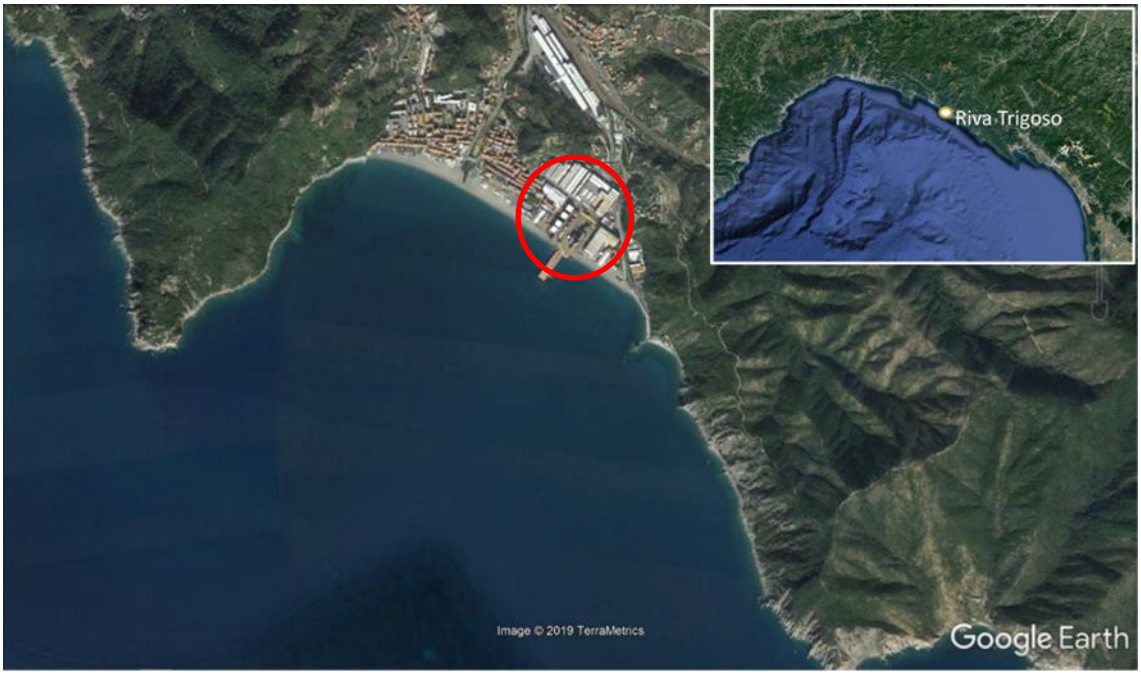


Figura 2-1 Sito di studio: la baia di Riva Trigoso con evidenziato nel cerchio rosso il cantiere navale di Fincantieri

3 Dati disponibili

3.1 Dati meteomarini

Tra le prime attività necessarie negli studi di dinamica costiera, vi è la caratterizzazione delle condizioni meteomarine di riferimento al largo del tratto di costa interessato, con particolare riferimento al moto ondoso.

Per quanto riguarda la disponibilità di registrazioni di moto ondoso, la principale fonte di riferimento nel nostro paese è la Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). I dati di boa possono essere utilizzati come

riferimento anche ad una certa distanza dal sito di interesse, qualora l'esposizione alle mareggiate per i diversi settori direzionali possa essere considerata simile tra il sito in esame ed il sito che ospita la boa ondametrica. Frequentemente, tuttavia, per la caratterizzazione meteomarina di un sito non è possibile fare affidamento alle misure. Questo avviene o perché i dati sono troppo frammentati a causa di malfunzionamenti dello strumento o periodi di manutenzione dello stesso, o perché le serie temporali disponibili coprono solo pochi anni (5÷10) oppure ancora perché per il paraggio in esame la boa non è disponibile o non è sufficientemente rappresentativa.

Sempre più spesso, pertanto, si fa ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteomarine attraverso modellistica numerica. Tale approccio, comunemente definito come "*wave hindcast*" permette di disporre di serie temporali, tra l'altro, di altezza d'onda, periodo e direzione, nel punto desiderato. Se da un lato la possibilità di disporre di ricostruzioni di condizioni meteomarine pregresse attraverso un approccio modellistico rappresenta oggi un formidabile supporto nell'ingegneria costiera ed offshore, dall'altro va sottolineata l'importanza di disporre di ricostruzioni modellistiche robuste, accurate e validate.

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l'intero bacino del Mediterraneo è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM) [1], prodotto da DHI in collaborazione con HyMO*Lab* (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Il database MWM deriva dall'implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell'arte rispettivamente nell'ambito della modellazione atmosferica (WRF-ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW di DHI) [3].

In Figura 3-1 e Figura 3-2 sono riportate rispettivamente la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso ed un dettaglio della "mesh" di calcolo adottata. La risoluzione del modello d'onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta. I dati sono stati estensivamente validati con confronti con anemometri, boe, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d'onda da satellite.

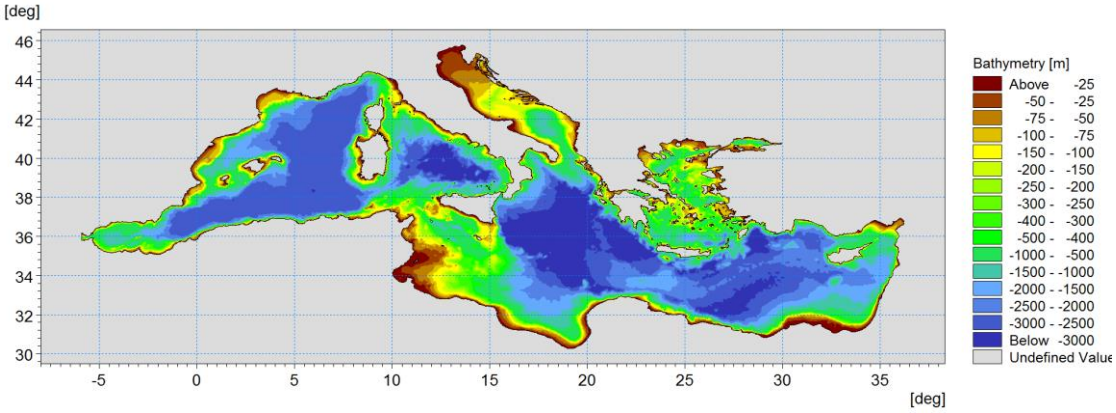


Figura 3-1 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

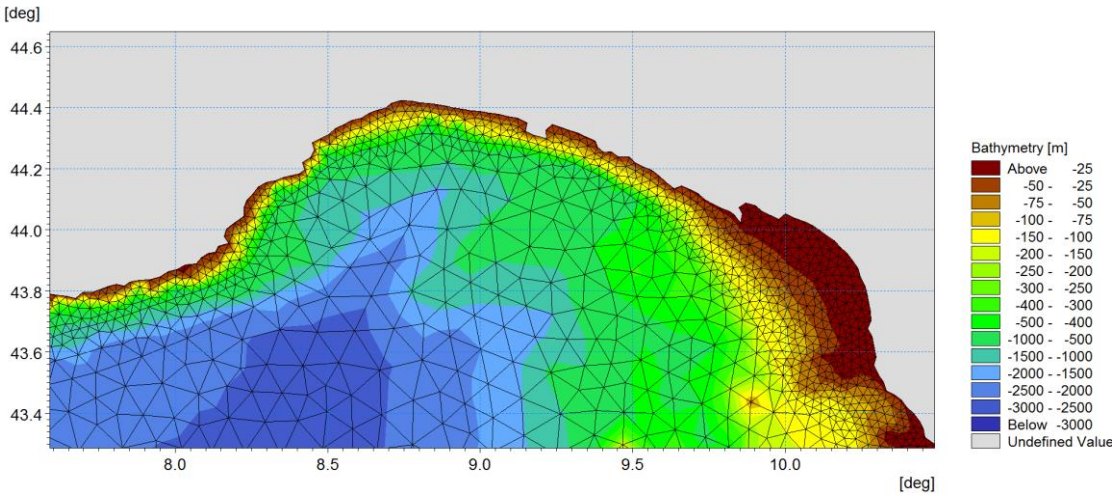


Figura 3-2 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM – dettaglio sul Mar Ligure

Il database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), descritto diffusamente in Allegato A al presente documento, è stato pertanto preso a riferimento per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito di studio.

La selezione della cella del database MWM più adeguata a rappresentare il clima meteomarino al largo di Riva Trigoso è stata effettuata tenendo in considerazione diversi aspetti:

- il punto deve essere ben rappresentativo dell’esposizione del sito al moto ondoso;
- in virtù della risoluzione del database MWM (circa 4 km), il punto deve essere collocato ad una profondità alla quale possa essere ritenuta trascurabile l’interazione dell’onda con il fondale, che viene pertanto demandata al modello di propagazione largo-costa descritto in seguito;
- la localizzazione del punto non deve essere troppo lontana dalla costa, in modo che il modello di propagazione largo-costa non presenti un dominio troppo ampio, con tempi di calcolo troppo onerosi.

Sulla base di tali prescrizioni e della risoluzione spaziale del database MWM è stato selezionato un punto per la caratterizzazione dei parametri d’onda relativamente ai 42 anni (1979-2020) di ricostruzione storica (modalità *hindcast*) delle serie orarie.

A seguire si riportano l’ubicazione grafica e le coordinate del punto selezionato.



Figura 3-3 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (LON 9.408°E, LAT 44.210°N) i cui dati dal 1979 al 2020 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

Tabella 3-1 Coordinate del punto selezionato dal dataset di MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]	Prof. [m]
MWM	9.408	44.210	150

3.1.1 Dati di vento

A seguire (Figura 3-4, Figura 3-5 e Tabella 3-2,) si riportano rispettivamente la serie di intensità e direzione del vento per il punto MWM selezionato, la sua rappresentazione in forma di rosa e la tabella di frequenza delle classi di intensità del vento in funzione della direzione.

Come si può osservare, nel periodo dei 42 anni considerati si raggiungono valori massimi di velocità del vento fino a 24-26 m/s circa. Dall'analisi della rosa del vento si evince che i venti presentano due settori direzionali caratterizzati dalla maggiore frequenza di provenienza, ovvero il primo e il secondo quadrante (settori di Nord Est e di Sud Est, rispettivamente).

La frequenza dei venti dal terzo quadrante (settore di Sud Ovest) e dal quarto quadrante (settore di Nord Ovest) risulta invece piuttosto ridotta.

In termini di intensità, gli eventi caratterizzati dalle velocità maggiori (superiori a 20 m/s) sono anch'essi associati alle direzioni di provenienza più frequenti (settore Nord-Nord Est), in particolare con direzioni di provenienza comprese tra 25°- 65°N (Grecale).

La condizione di calma, qui associata ad intensità del vento inferiore a 2 m/s, si verifica per circa il 25% del tempo, ovvero 3 mesi all'anno in media.

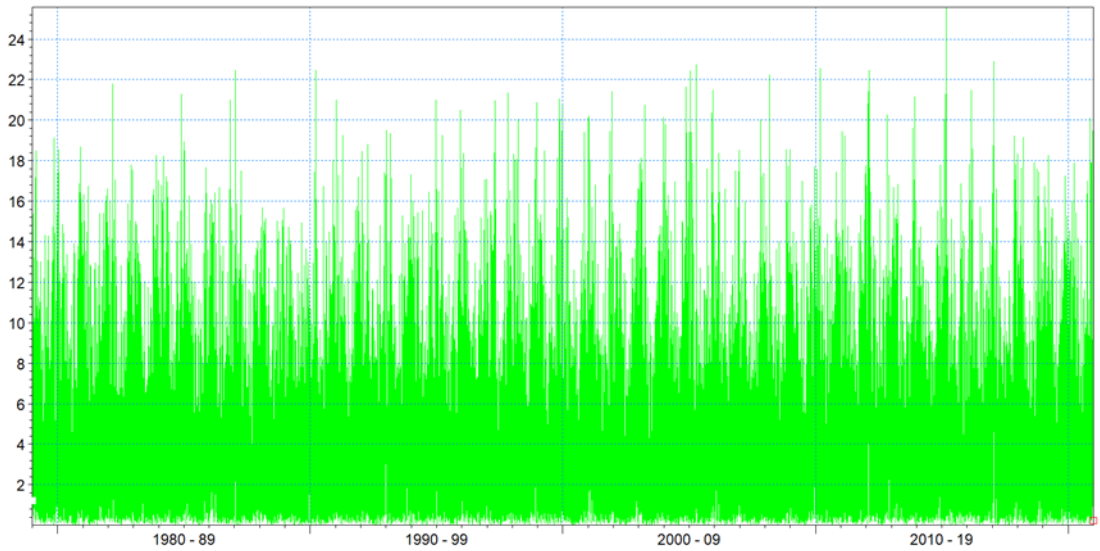


Figura 3-4 Serie di valori di intensità del vento WS, in m/s, per il punto MWM (LON 9.408°E, LAT 44.210°N) per l'intero periodo 1979 - 2020

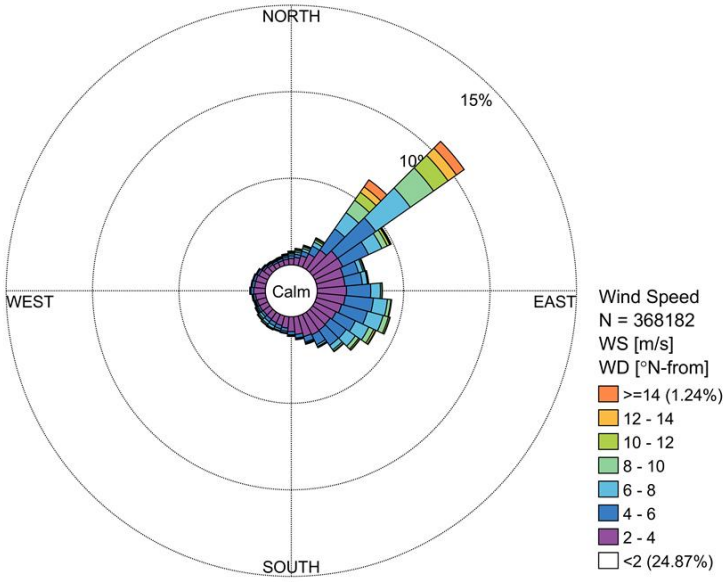


Figura 3-5 Rosa del vento per il punto MWM (LON 9.408°E, LAT 44.210°N) per il periodo 1979-2020, con la discretizzazione per settori di provenienza. La calma, qui associata ad intensità inferiori a 2 m/s, si verifica per circa il 25% del tempo, ovvero per circa 3 mesi all'anno in media

Tabella 3-2 Frequenza per classi di intensità del vento WS (colonne) e direzione media WD (righe) per il punto MWM (LON 9.408°E, LAT 44.210°N) per l'intero periodo 1979 – 2020

Riva Trigoso (9.40E;44.22N;-120.00mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) All

WD [°N-from] - Wind Direction

	[0-2[	[2-4[	[4-6[	[6-8[	[8-10[	[10-12[	[12-14[	[14-16[	[16-18[	[18-20[	[20-22[	[22-24[	[24-26[	[26-28[	Total	Accum
[345-355[	1832	1199	486	306	191	139	68	26	9	-	-	-	-	-	4256	368182
[335-345[	1830	1107	450	234	136	81	54	13	7	-	-	-	-	-	3912	363926
[325-335[	1933	1116	405	235	137	70	24	-	1	-	-	-	-	-	3921	360014
[315-325[	2076	1323	391	219	134	44	17	2	-	-	-	-	-	-	4206	356093
[305-315[	2214	1635	392	193	90	25	8	2	-	-	-	-	-	-	4559	351887
[295-305[	2326	2086	419	179	57	15	11	4	1	-	-	-	-	-	5098	347328
[285-295[	2480	2313	479	171	45	15	1	-	-	-	-	-	-	-	5504	342230
[275-285[	2429	2328	555	179	50	8	2	-	-	-	-	-	-	-	5551	336726
[265-275[	2451	2482	584	183	65	18	2	2	-	-	-	-	-	-	5787	331175
[255-265[	2431	2112	437	212	88	34	7	6	2	1	-	-	-	-	5330	325388
[245-255[	2362	1974	327	184	111	77	48	16	4	2	2	-	-	-	5107	320058
[235-245[	2462	1918	438	272	157	96	86	25	11	-	-	-	-	-	5465	314951
[225-235[	2522	1765	533	527	302	127	62	12	3	1	-	-	-	-	5854	309486
[215-225[	2548	1845	716	565	294	118	30	4	-	-	-	-	-	-	6120	303632
[205-215[	2650	1962	810	577	235	77	22	2	1	-	-	-	-	-	6336	297512
[195-205[	2711	2132	743	383	176	72	11	3	-	-	-	-	-	-	6231	291176
[185-195[	2730	2431	698	319	131	55	17	10	1	-	-	-	-	-	6392	284945
[175-185[	2701	3152	681	212	94	30	20	4	-	-	-	-	-	-	6894	278553
[165-175[	2650	3798	779	192	86	47	25	15	4	2	-	-	-	-	7598	271659
[155-165[	2597	4559	1201	252	133	70	24	26	3	2	-	-	-	-	8867	264061
[145-155[	2816	4804	2346	421	158	81	33	15	4	-	-	-	-	-	10678	255194
[135-145[	2716	4713	3970	1116	359	120	26	10	1	-	-	-	-	-	13031	244516
[125-135[	2880	4581	4182	2379	851	308	68	19	1	-	-	-	-	-	15269	231485
[115-125[	3010	4997	4554	3142	1144	423	126	24	3	-	-	-	-	-	17423	216216
[105-115[	3088	5566	5705	3453	1160	316	70	13	-	-	-	-	-	-	19371	198793
[95-105[	3218	5986	6043	3000	728	159	17	2	-	-	-	-	-	-	19153	179422
[85-95[	3276	6238	5166	2062	330	72	20	3	-	-	-	-	-	-	17167	160269
[75-85[	3195	5937	3727	1072	219	63	26	4	-	-	-	-	-	-	14243	143102
[65-75[	3189	5951	3352	996	300	129	44	15	6	-	-	-	-	-	13982	128859
[55-65[	3018	6549	6084	3139	1271	570	220	94	34	9	1	-	-	-	20989	114877
[45-55[	2728	6507	9935	8989	6039	3769	2176	1026	646	251	83	15	1	-	42165	93888
[35-45[	2449	5076	5503	4204	3210	2071	1415	942	534	238	96	5	2	-	25745	51723
[25-35[	2287	3141	1832	932	511	298	105	78	10	7	5	1	-	-	9207	25978
[15-25[	2052	2232	960	588	383	244	84	37	12	5	-	-	-	-	6597	16771
[5-15[	1896	1622	672	450	346	269	136	38	9	4	1	-	-	-	5443	10174
[-5-5[	1813	1334	609	373	265	184	113	27	12	1	-	-	-	-	4731	4731
Total	91566	118471	76164	41910	19986	10294	5218	2519	1319	523	188	21	3	-	368182	-
Accum	91566	210037	286201	328111	348097	358391	363609	366128	367447	367970	368158	368179	368182	368182	-	-

3.1.2 Dati di moto ondoso

In Figura 3-6 viene riportato l'andamento dell'altezza d'onda significativa per il periodo 1979-2020, per il punto MWM (LON 9.408°E, LAT 44.210°N), ubicato a circa 5.4 km dal litorale di Riva Trigoso.

Come si evince dai dati estratti, l'evento maggiormente gravoso nei 42 anni di dati orari a disposizione è stato registrato il 28 dicembre 1999, con una altezza d'onda al largo pari a 8.0 m. Nei mesi di dicembre del 2011, ottobre 2008, febbraio 1990, si sono verificate le mareggiate rispettivamente identificate come la seconda, la terza e la quarta per valore di altezza d'onda significativa.

Il più recente evento del 30 ottobre 2018 risulta la nona mareggiata per gravosità di Hs rispetto alla serie di dati a disposizione.

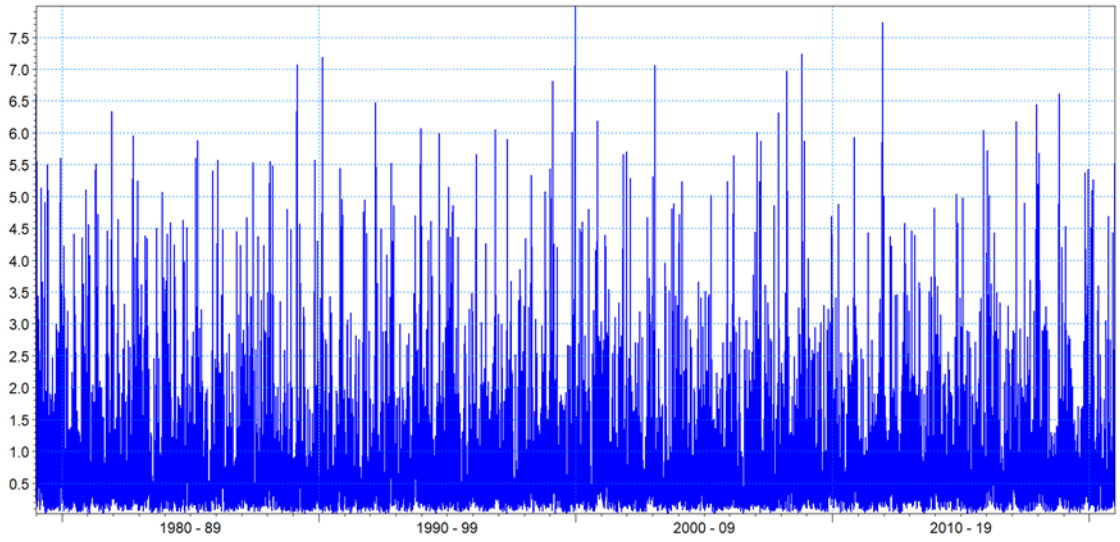


Figura 3-6 Serie di altezza d'onda significativa per il punto MWM (LON 9.408°E, LAT 44.210°N) per il periodo 1979 – 2020

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 3-7) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 3-3) si evince che le mareggiate più frequenti e più intense provengono dal settore di Libeccio, con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 215°N e 235°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 25% delle onde, corrispondente in media a circa 3 mesi/anno. In questo settore direzionale l'onda raggiunge valori di altezza significativa anche superiori a 7.5 m.

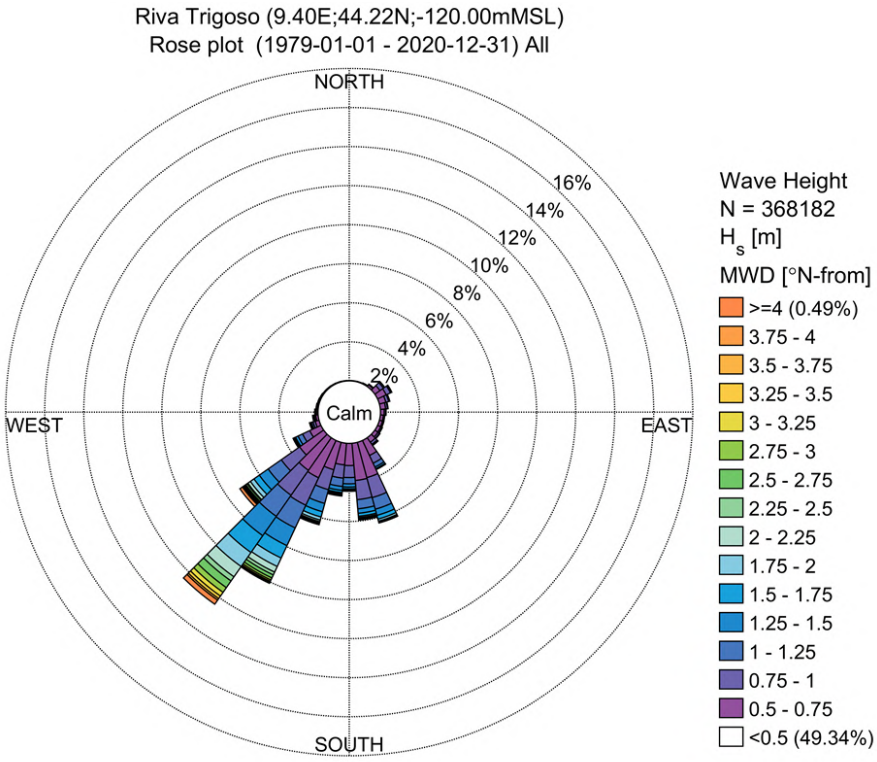


Figura 3-7 Rosa del clima ondoso al largo per il punto MWM (LON 9.408°E, LAT 44.210°N) per il periodo 1979 – 2020. La calma è riferita ad onde con altezza d'onda significativa H_s inferiore a 0.5 m

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.5 m, si verifica per circa il 49% del tempo, corrispondente in media a circa 6 mesi/anno.

Tabella 3-3 Frequenza per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto MWM (LON 9.408°E, LAT 44.210°N) calcolata sul periodo 1979 – 2020

Riva Trigoso
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) All
H_[m]_Wave Height

MWD [°N-from] - Mean Wave Direction

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.25[	[1.25-1.5[	[1.5-1.75[	[1.75-2[	[2-2.25[	[2.25-2.5[	[2.5-2.75[	[2.75-3[	[3-3.25[	[3.25-3.5[	[3.5-3.75[	[3.75-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	[8-8.5[	Total	Accum
[345-355[	17	189	80	13	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	300	368182
[335-345[	20	155	86	28	5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	295	367882
[325-335[	19	157	97	34	10	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	320	367587
[315-325[	25	162	107	53	11	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	360	367267
[305-315[	32	182	96	59	30	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	403	366907
[295-305[	69	184	129	87	47	5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	522	366504
[285-295[	122	235	153	108	55	9	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	691	365982
[275-285[	767	558	208	120	67	20	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1745	365291
[265-275[	1346	876	274	167	105	59	21	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2852	363546
[255-265[	1581	1049	427	242	184	130	49	14	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3679	360694
[245-255[	2018	1756	752	434	300	207	103	43	30	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5645	357015
[235-245[	4440	4347	2331	1486	945	514	237	121	88	29	39	7	6	1	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	14593	351370
[225-235[	7473	8763	5529	4220	3028	2037	1234	824	575	156	315	220	196	194	189	-	159	178	117	64	31	14	6	5	-	35527	336777
[215-225[	7272	11348	7511	5723	4861	4451	3871	3229	2363	962	1534	1084	861	573	346	20	383	282	158	65	28	14	7	1	-	56947	301250
[205-215[	6182	10115	7769	5704	4725	3687	2580	1760	1164	588	629	429	272	171	49	37	103	33	12	4	9	2	1	-	-	46025	244303
[195-205[	5642	7304	5355	3888	2691	1620	1032	589	307	220	132	87	60	25	15	18	32	14	3	3	2	-	-	-	-	29039	198278
[185-195[	5996	6852	4095	2507	1570	735	415	203	119	150	63	38	31	4	16	9	18	15	3	1	1	-	-	-	-	22841	169239
[175-185[	7212	8520	4184	2260	1187	603	339	164	81	70	56	24	20	13	9	8	18	7	2	-	-	-	-	-	-	24777	146398
[165-175[	9795	13460	7043	3636	1730	850	560	254	151	130	85	42	33	14	15	8	8	3	-	-	-	-	-	-	-	37817	121621
[155-165[	9069	13156	6887	3900	2265	1206	735	393	175	97	63	22	5	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37975	83804
[145-155[	2285	4278	3124	1610	801	337	134	58	17	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12648	45829
[135-145[	272	1047	1039	480	187	61	30	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3120	33181
[125-135[	213	878	724	326	106	20	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2278	30061
[115-125[	184	930	662	266	67	13	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2125	27783
[105-115[	202	905	601	205	57	17	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1989	25658
[95-105[	214	1046	567	221	43	13	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2106	23669
[85-95[	209	1157	705	291	57	14	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2434	21563
[75-85[	236	1449	987	356	98	19	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3148	19129
[65-75[	213	1873	1264	552	188	26	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4119	15981
[55-65[	182	1946	1794	888	241	55	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5107	11862
[45-55[	110	1276	1185	794	263	28	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3657	6755
[35-45[	87	676	402	133	40	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1341	3098
[25-35[	58	383	160	22	3	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	630	1757
[15-25[	54	303	78	19	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	459	1127
[5-15[	49	226	64	15	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	357	668
[-5-5[	28	212	51	18	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	311	311
Total	73693	107953	66520	40865	25975	16753	11385	7660	5072	2409	2916	1953	1484	995	641	100	722	532	295	138	71	30	14	6	-	368182	-
Accum	73693	181646	248166	289031	315006	331759	343144	350804	355876	358285	361201	363154	364638	365633	366274	366374	367096	367628	367923	368061	368132	368162	368176	368182	368182	-	-

3.2 Dati di livello della superficie marina

Per la definizione dei livelli marini da considerare nella progettazione degli interventi si è fatto riferimento alla serie osservata del mareografo di Genova, il più vicino al sito e con maggior disponibilità di dati recenti (la monografia della stazione mareografica è riportata in Figura 3-8).

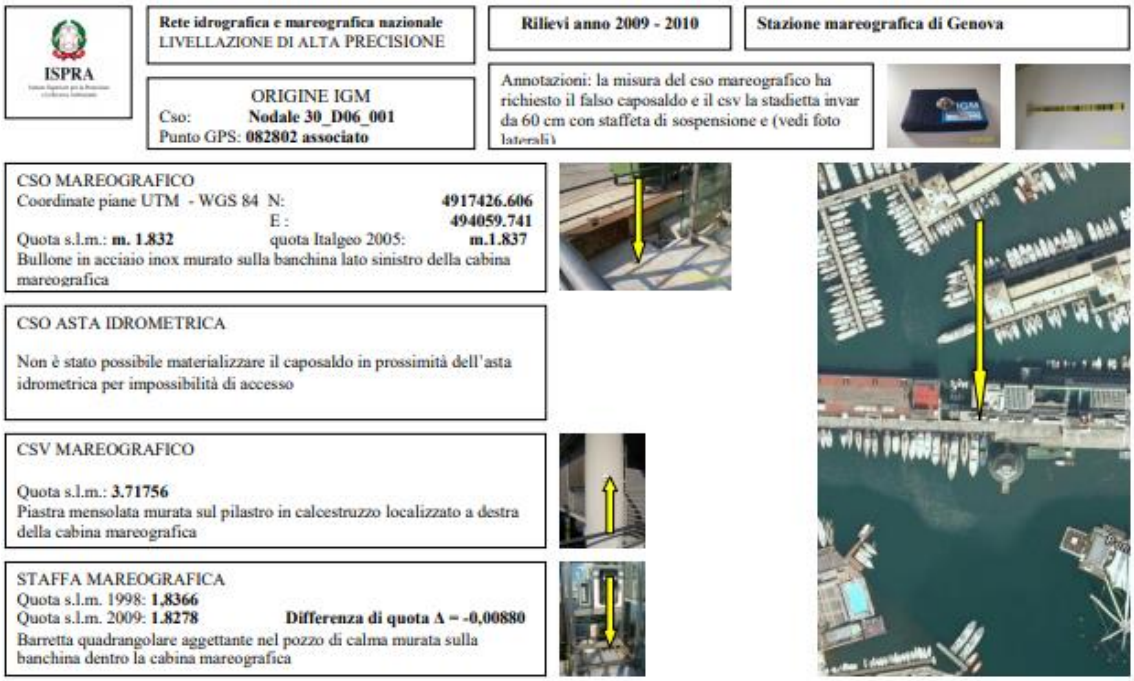


Figura 3-8 Monografia della stazione mareografica di Genova

In particolare, per le elaborazioni svolte nel presente studio si è fatto riferimento alle registrazioni disponibili nel periodo 1.1.2010 – 31.12.2019.

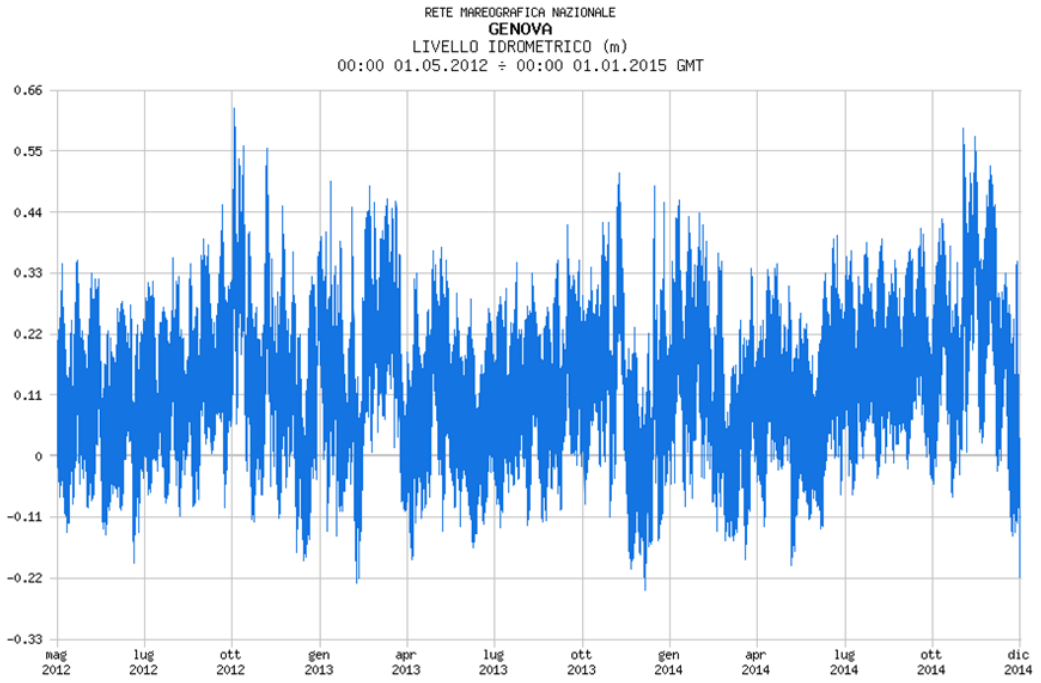


Figura 3-9 Osservazioni del livello idrometrico al mareografo di Genova (dettaglio dal 2011 ad 2015)

3.3 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione topo-batimetrica del sito, Fincantieri ha messo a disposizione un rilievo di dettaglio della spiaggia emersa e sommersa, commissionato nell'ambito dello studio in oggetto e predisposto nel Novembre del 2021 (Figura 3-10).

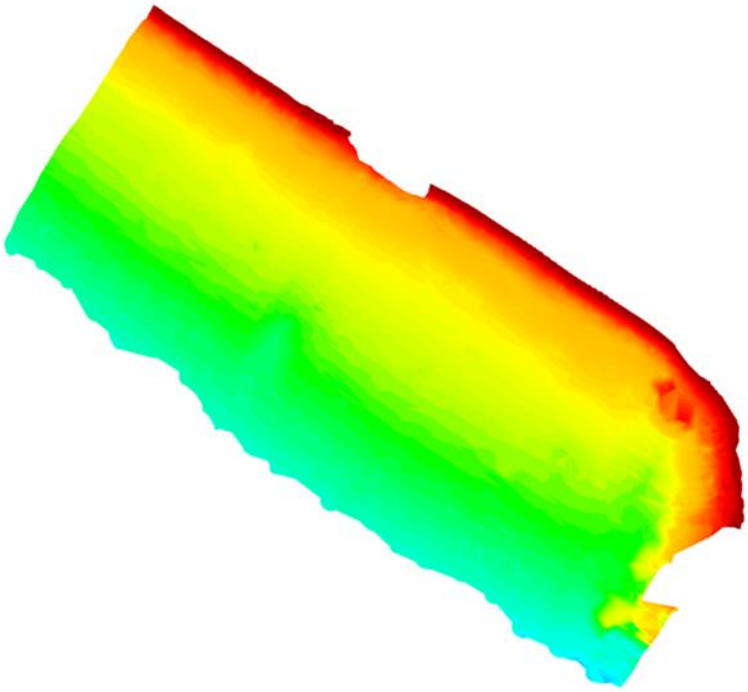


Figura 3-10 Rilievo di dettaglio della spiaggia di Riva Trigoso (Novembre 2021)

Le dimensioni del dominio di calcolo del modello numerico implementato sono tuttavia più estese rispetto all'area per la quale risulta disponibile tale rilievo.

Ad integrazione dei recenti dati locali, sono state pertanto utilizzate le carte nautiche digitali appartenenti al database CM-93 di C-MAP, un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato da Jeppesen [2] (Figura 3-11). I dati forniti da questo database sono direttamente importabili nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo di DHI, consentendo quindi una rapida caratterizzazione batimetrica dell'area.

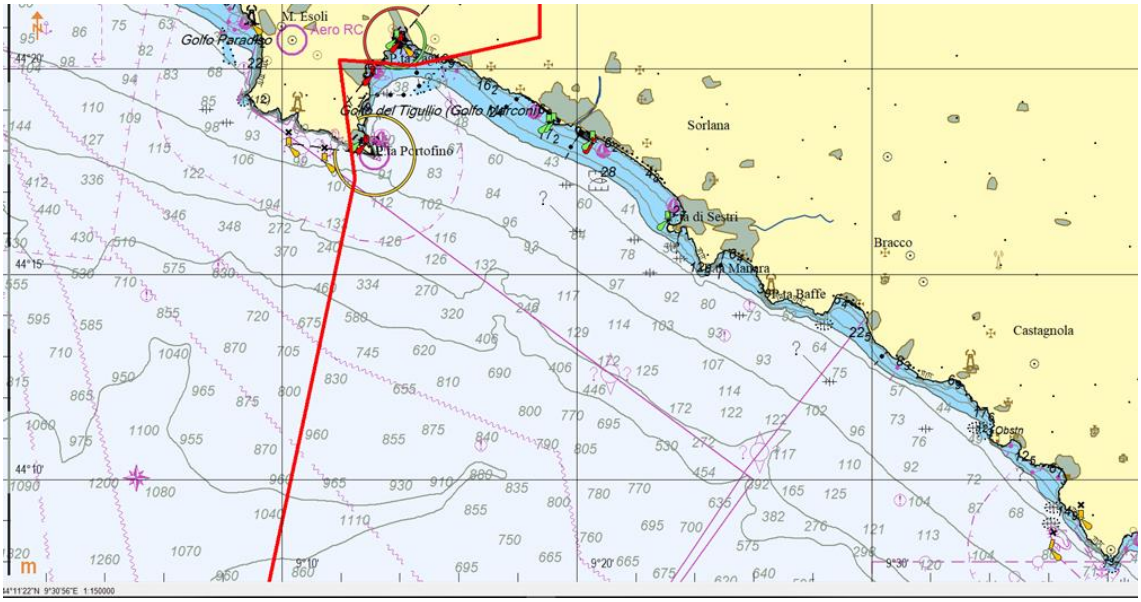


Figura 3-11 Rappresentazione della cartografia nautica digitale per il sito oggetto di studio (Jeppesen)

3.4 Caratteristiche dei sedimenti

Nell'ambito del progetto è stata predisposta sia un'approfondita indagine sedimentologica del sito, indirizzata principalmente alla caratterizzazione del materiale che costituisce lo strato più profondo della spiaggia, sede delle fondazioni su pali delle nuove strutture previste, sia un'analisi sedimentologica dello strato più superficiale dell'arenile, soggetto alla possibile mobilitazione durante gli eventi più intensi.

L'analisi dei risultati granulometrici dei campioni prelevati ha permesso di ricavare, in ogni punto, i diametri percentili caratteristici d_n, ossia i diametri associati ad una certa percentuale di passante, dove il numero n indica la percentuale considerata (d_{16}, d_{50}, d_{84}).

Rimandando alla relazione ambientale per gli approfondimenti prettamente geologici delle indagini degli strati profondi, a seguire si riportano i risultati delle analisi e l'ubicazione dei punti di campionamento dei sedimenti per i campioni superficiali.

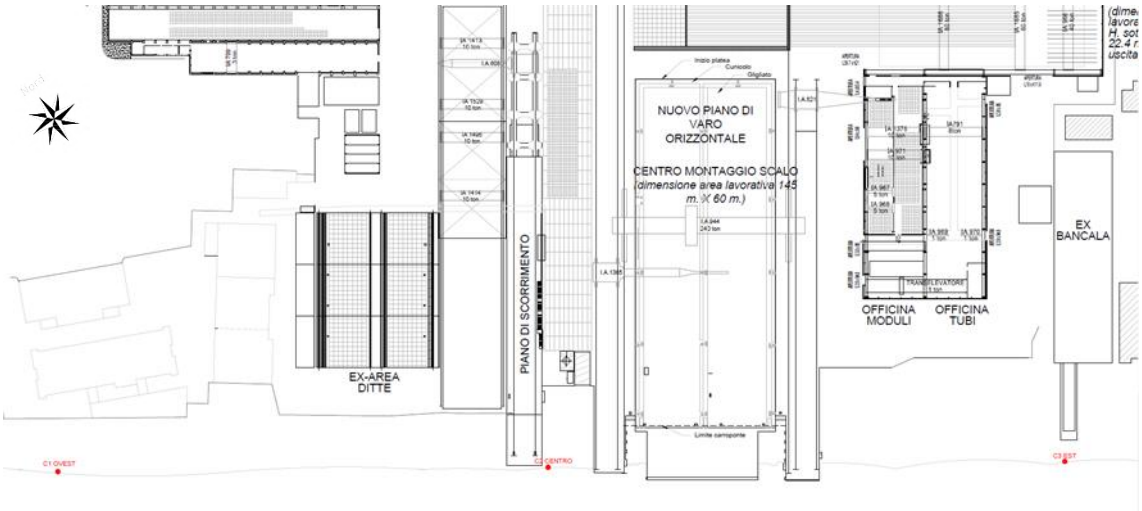


Figura 3-12 Ubicazione campioni battigia

Tipo di campione C1 Ovest

Campione umido	**1594,46**	Tara	**593,34**
Campione secco	**1531,21**	Umidità %	**6,74**

Massa campione 937,87

VAGLI	TRATT. (grammi)	TRATT. PROGR.	% PROGR. TRATT.	% PROGR. DI PASS.
100,000	0,00	0,0	0,0	100,0
71,000	0,00	0,0	0,0	100,0
60,000	0,00	0,0	0,0	100,0
40,000	0,00	0,0	0,0	100,0
25,000	0,00	0,0	0,0	100,0
15,000	0,00	0,0	0,0	100,0
10,000	0,00	0,0	0,0	100,0
5,000	4,73	4,7	0,5	99,5
2,000	158,71	163,4	17,4	82,6
1,000	741,36	904,8	96,5	3,5
0,425	28,61	933,4	99,5	0,5
0,180	0,28	933,7	99,6	0,4
0,075	0,06	933,8	99,6	0,4
FONDO	4,12	937,9	100,0	0,0

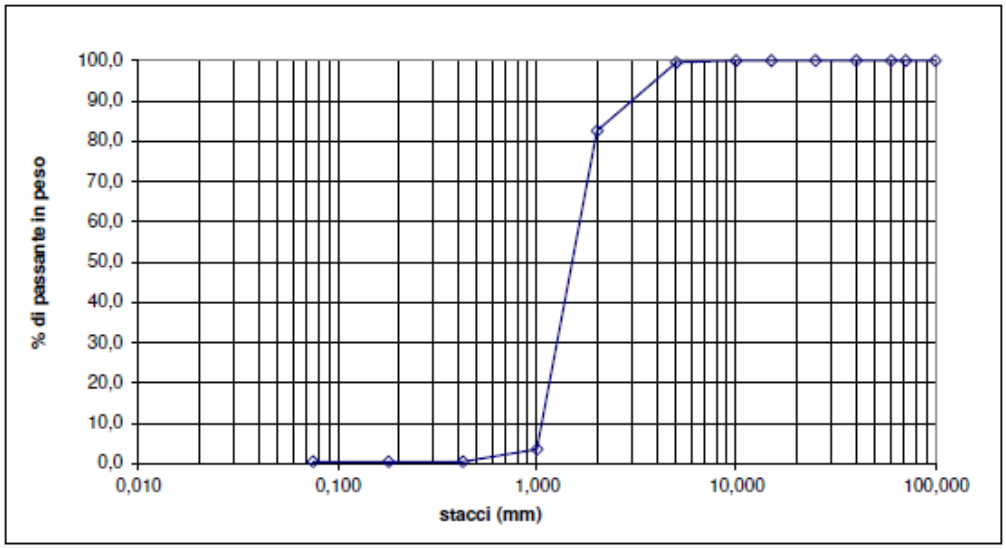


Figura 3-13 Analisi granulometrica del campione di sedimento C1 Ovest, raccolto sulla linea di riva, a ponente del cantiere navale Fincantieri

Tipo di campione C2 Centro

Campione umido	**2080,40**	Tara	**492,20**
Campione secco	**2043,70**	Umidità %	**2,37**

Massa campione 1551,50

VAGLI	TRATT. (grammi)	TRATT. PROGR.	% PROGR. TRATT.	% PROGR. DI PASS.
100,000	0,00	0,0	0,0	100,0
71,000	0,00	0,0	0,0	100,0
60,000	0,00	0,0	0,0	100,0
40,000	0,00	0,0	0,0	100,0
25,000	0,00	0,0	0,0	100,0
15,000	16,47	16,5	1,1	98,9
10,000	13,69	30,2	1,9	98,1
5,000	541,76	571,9	36,9	63,1
2,000	948,50	1520,4	98,0	2,0
1,000	22,66	1543,1	99,5	0,5
0,425	0,90	1544,0	99,5	0,5
0,180	0,36	1544,3	99,5	0,5
0,075	0,21	1544,6	99,6	0,4
FONDO	6,95	1551,5	100,0	0,0

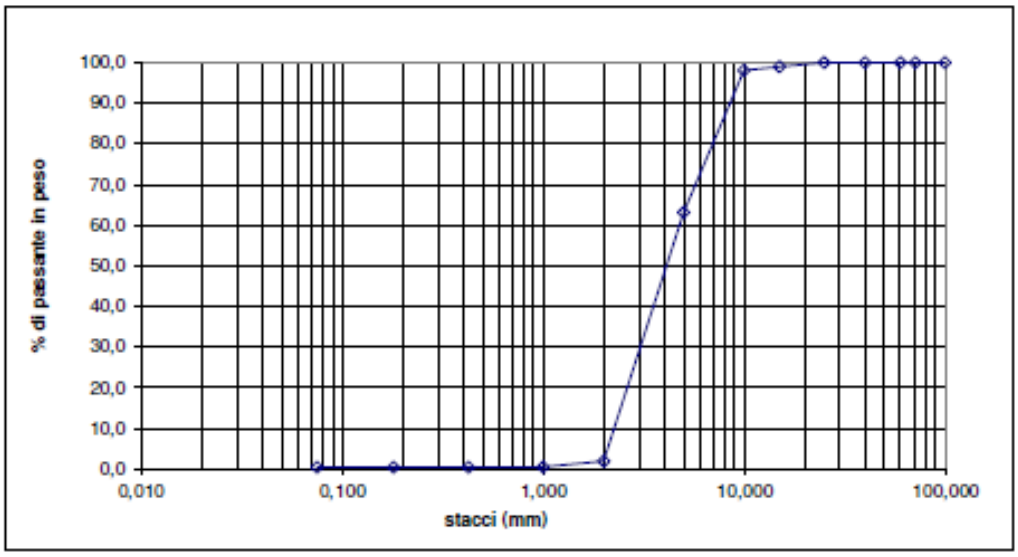


Figura 3-14 Analisi granulometrica del campione di sedimento C2 centro, raccolto sulla linea di riva, in prossimità del cantiere navale Fincantieri

Tipo di campione C3 Est

Campione umido	**1972,21**	Tara	**488,55**
Campione secco	**1757,48**	Umidità %	**16,92**

Massa campione 1268,93

VAGLI	TRATT. (grammi)	TRATT. PROGR.	% PROGR. TRATT.	% PROGR. DI PASS.
100,000	0,00	0,0	0,0	100,0
71,000	0,00	0,0	0,0	100,0
60,000	0,00	0,0	0,0	100,0
40,000	0,00	0,0	0,0	100,0
25,000	0,00	0,0	0,0	100,0
15,000	0,00	0,0	0,0	100,0
10,000	21,22	21,2	1,7	98,3
5,000	98,51	119,7	9,4	90,6
2,000	123,50	243,2	19,2	80,8
1,000	106,66	349,9	27,6	72,4
0,425	450,95	800,8	63,1	36,9
0,180	453,24	1254,1	98,8	1,2
0,075	9,54	1263,6	99,6	0,4
FONDO	5,31	1268,9	100,0	0,0

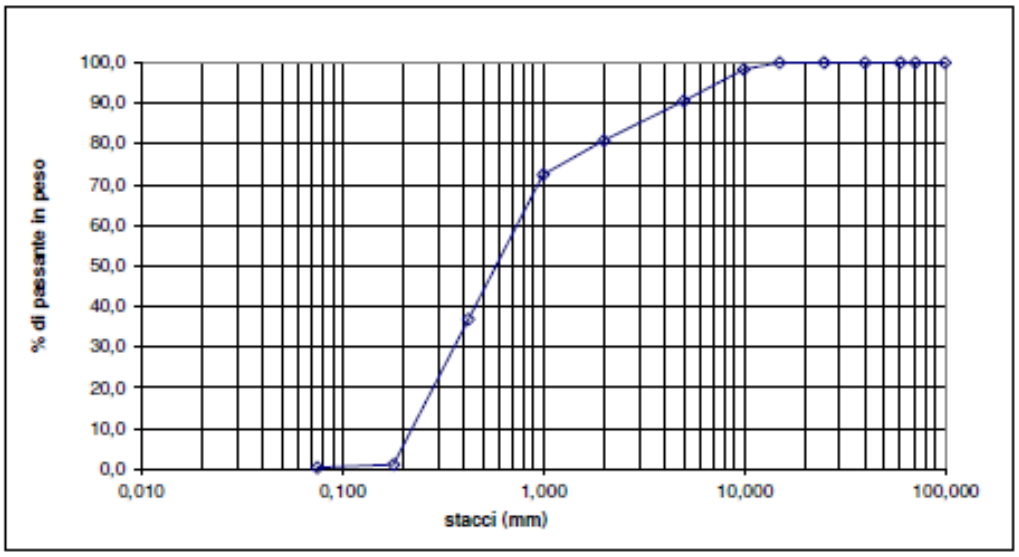


Figura 3-15 Analisi granulometrica del campione di sedimento C3 est, raccolto sulla linea di riva, a levante del cantiere navale di Fincantieri

4 Propagazione delle onde dal largo a costa

Al fine di propagare l'intera serie ultra-quarantennale di moto ondoso da largo sino al litorale di Riva Trigoso, ove è ubicato il cantiere navale di Fincantieri oggetto dell'ampliamento proposto, è stato implementato il modulo MIKE 21 SW - Spectral Waves [3] di DHI, un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di *swell* sia offshore, sia in aree costiere.

Tale modello, a maglia triangolare "flessibile", permette di utilizzare una risoluzione spaziale variabile, consentendo di impiegare una risoluzione elevata nelle aree per le quali si richiede un maggior dettaglio, laddove rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo e frangimento determinano una forte trasformazione delle caratteristiche dell'onda incidente su distanze relativamente limitate.

I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- generazione dell'onda ad opera del vento;
- interazione non lineare onda-onda;
- dissipazione dovuta al cosiddetto "*white capping";*
- dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- dissipazione dovuta al frangimento;
- rifrazione e *shoaling* dovuti alle variazioni del fondale;
- interazione onde-correnti;
- diffrazione;
- riflessione.

Un'accurata descrizione del modulo MIKE 21 SW è riportata nell'Allegato B al presente elaborato.

I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione;
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, *white-capping*, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della *mesh*, sono costituiti essenzialmente dai parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa, periodo, direzione media, *radiation stress*.

4.1 Condizioni d'onda

Il modello d'onda MIKE 21 SW è stato implementato applicando, come condizioni lungo il contorno aperto posto al largo del dominio di calcolo, l'intera serie oraria di 42 anni di dati d'onda ricavati dal modello a larga scala MWM.

4.2 Batimetria e dominio di calcolo

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 3.3, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre un tratto di costa caratterizzato da uno sviluppo costiero complessivo di circa 8 km, dalla Baia del Silenzio (Comune di Sestri Levante) a ponente sino a Punta Moneglia a levante, e un'estensione verso il largo di circa 4.5 km.

La dimensione e la risoluzione del dominio di calcolo sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio, come anticipato, si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di CMAP e al rilievo batimetrico di dettaglio effettuato nel mese di Novembre 2021. Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato nella figura a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

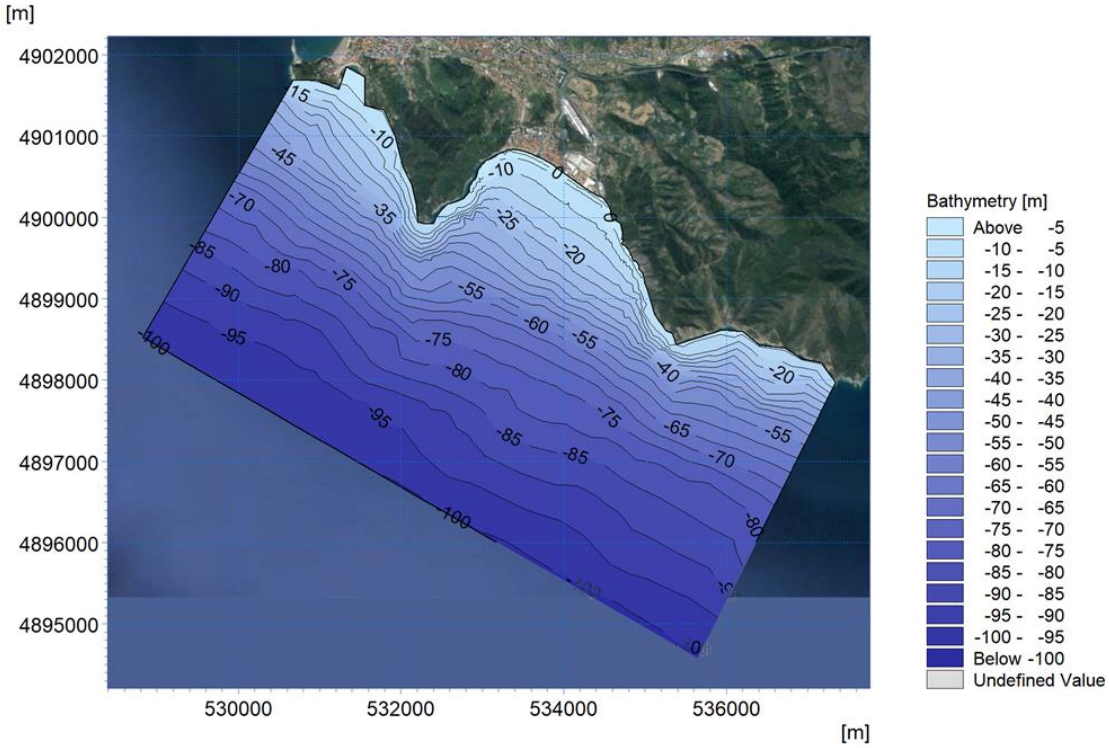


Figura 4-1 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 300 m, per aumentare progressivamente a 100 m nell'area centrale, mentre in prossimità della costa la risoluzione è di circa 30 m (Figura 4-2).

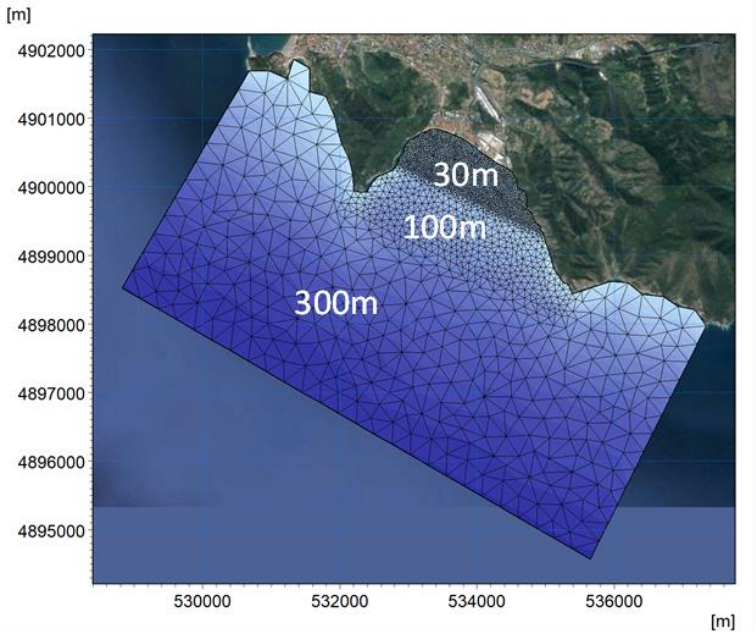


Figura 4-2 Rappresentazione della differente risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso

Complessivamente, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 5.300 elementi.

4.3 Risultati del modello di propagazione del moto ondoso largo-costa

Le simulazioni hanno permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo, rendendo pertanto possibile estrarre la serie di moto ondoso in qualsiasi punto sottocosta.

In queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto all'altezza d'onda, e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione da largo verso costa per l'intera serie dei 42 anni di dati orari a disposizione.

Infine, la variazione dell'orientazione dei vettori nell'avvicinamento a costa, che tendendo a disporsi perpendicolarmente ad essa, mette in evidenza il fenomeno della rifrazione. Questo fenomeno è tanto più marcato quanto più la direzione di provenienza delle onde al largo è inclinata rispetto alla perpendicolare a costa.

Alcuni esempi di distribuzione dell'altezza d'onda significativa sono riportati in Figura 4-3 e Figura 4-4.

Al largo i risultati del modello d'onda mostrano una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: le pendenze elevate determinano infatti ben poche dissipazioni dell'energia ondosa con l'avvicinarsi alla costa, mentre all'interno della baia di Riva si osserva l'interazione con i fondali più bassi, sia in prossimità della spiaggia che dei promontori laterali.

Il paraggio è esposto prevalentemente agli eventi da Libeccio, sebbene punta Manara schermi parzialmente la porzione più a ponente della spiaggia.

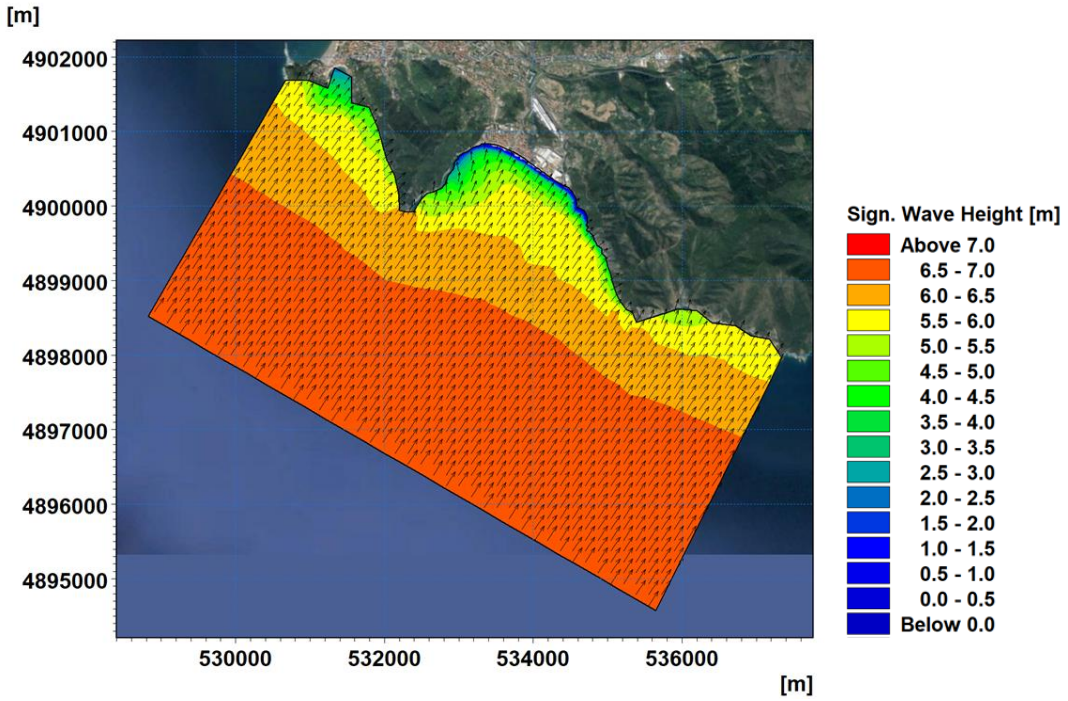


Figura 4-3 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Libeccio (dati di onda del 30 Ottobre 2018 ore 2)

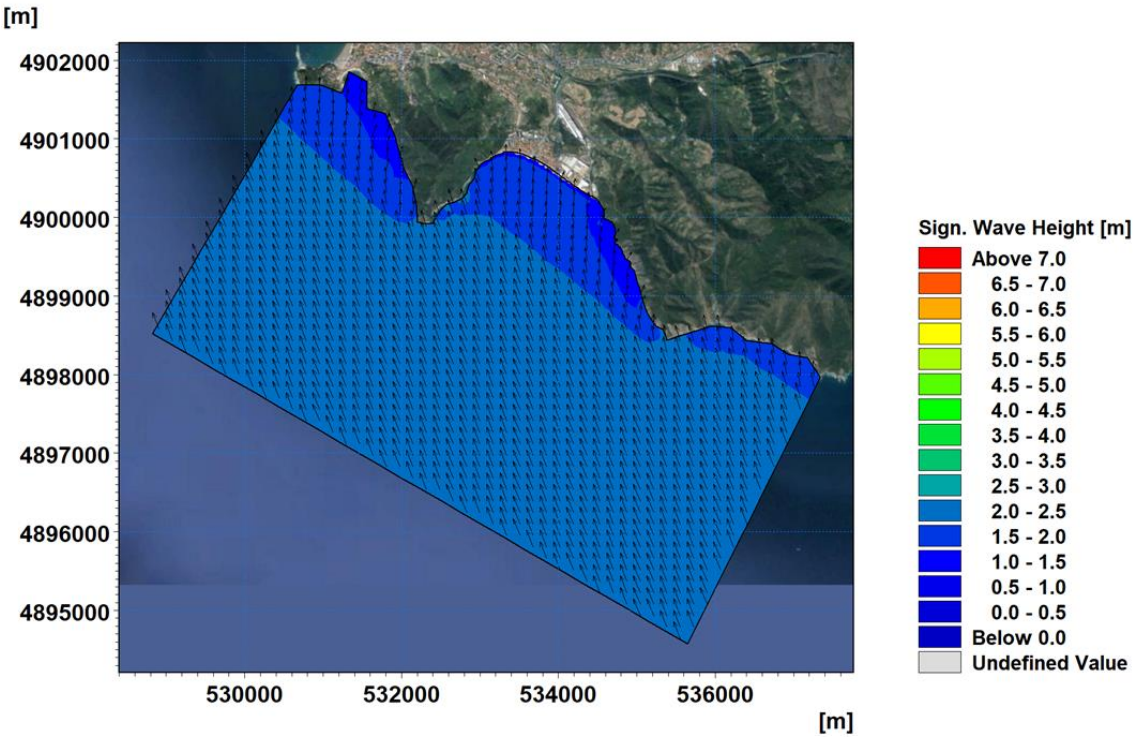


Figura 4-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Mezzogiorno (dati del 9 Gennaio 2018 ore 2)

Per supportare le verifiche richieste si è proceduto con l'estrazione della serie di altezza d'onda significativa in un punto al limite del paraggio di Riva Trigoso, denominato *punto P*, nel quale è stata predisposta la caratterizzazione del moto ondoso sottocosta, propedeutica all'analisi statistica direzionale degli eventi estremi (Capitolo 5).

La caratterizzazione del moto ondoso nel punto P ha permesso inoltre l'identificazione di condizioni d'onda rappresentative per l'analisi di dettaglio delle dinamiche costiere. A tal fine si è proceduto con l'implementazione di un modello bidimensionale integrato onda-corrente (Capitolo 6), caratterizzato da un dominio di calcolo focalizzato sulla zona di interesse e a maggiore risoluzione spaziale rispetto al modello di propagazione largo-costa.

A seguire si riporta l'ubicazione del punto P (Figura 4-5) e la relativa rosa del moto ondoso (Figura 4-6).



Figura 4-5 Ubicazione del punto P (533245m E, 4899097m N), utilizzato per la caratterizzazione del clima ondoso sottocosta

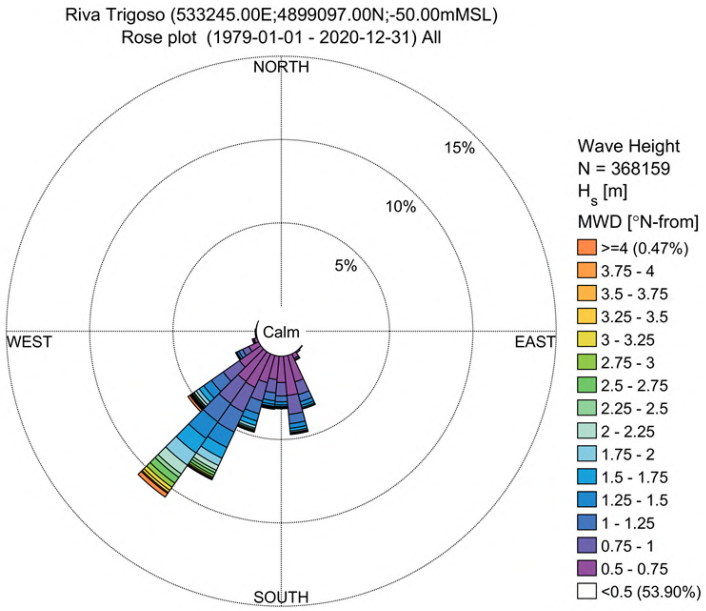
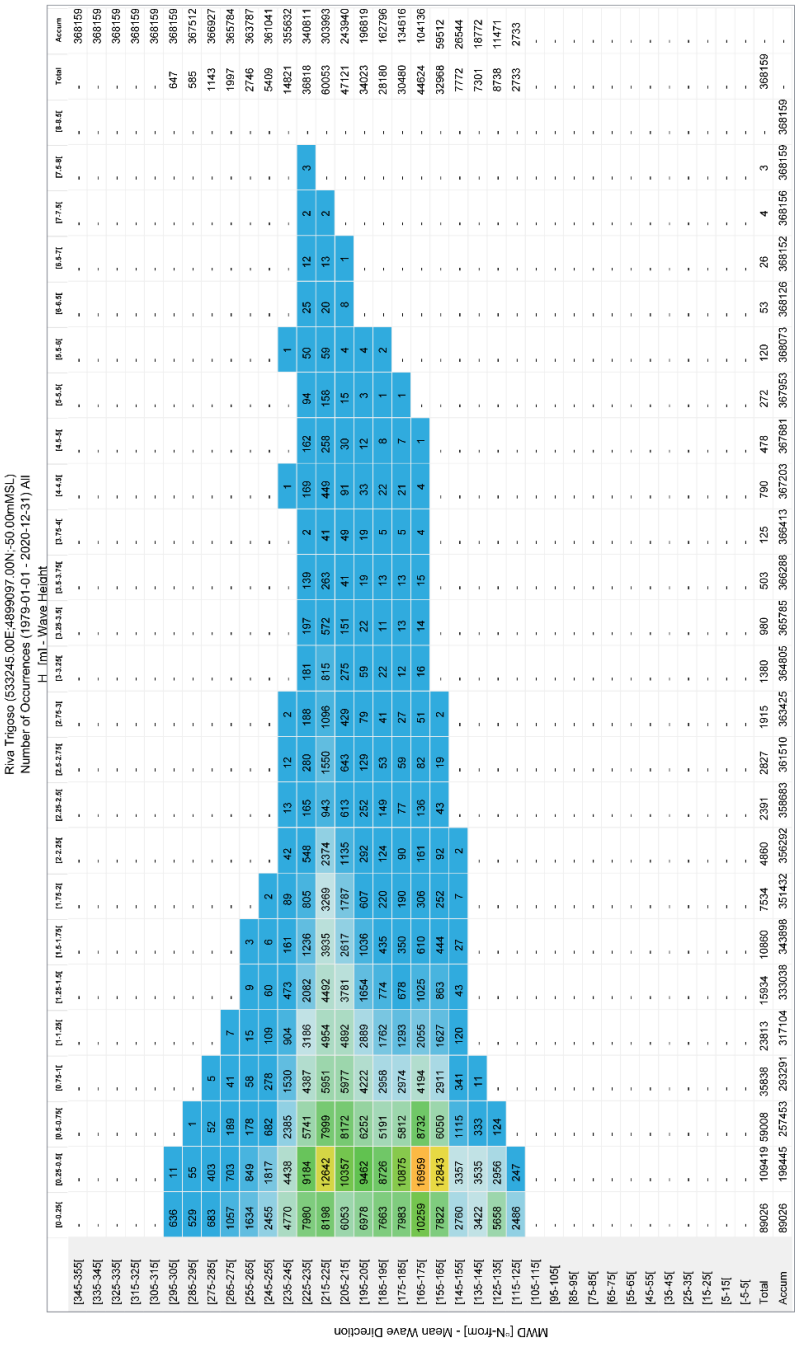


Figura 4-6 Rosa del clima ondoso per il punto P (533245m E, 4899097m N), ricavata sulla base dei dati riferiti al periodo 1979 – 2020. La calma è relativa ad onde con H_s inferiori a 0.5 m

Dall’analisi della rosa del clima ondoso sottocosta (Figura 4-6) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 5-1) per il punto P, si evince che anche più in prossimità della costa le mareggiate più frequenti e più intense provengono dal settore di Libeccio, con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 205°N e 235°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 26% delle onde, corrispondente in media a circa 3 mesi/anno.

Minore risulta l’occorrenza delle onde da Scirocco, anche se il settore comprensivo delle direzioni tra 165°N e 175°N presenta il 12% di frequenza sul totale, pari quindi a 1.5 mesi/anno in media. La calma, qui associata a onde con Hs inferiore a 0.5m, si presenta mediamente per il 54% dell’anno.

Tabella 4-1 Frequenza per classi di altezza d’onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto P (533245m E, 4899097m N)



5 Analisi statistica degli eventi estremi sottocosta

Sulla base della serie di dati estratti nel punto P al limite del paraggio di Riva Trigoso, si è proceduto con l'analisi statistica per la serie di altezza d'onda significativa, finalizzata alla definizione degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno. È stata inoltre processata la serie di registrazione dei livelli relativi al mareografo di Genova, i cui risultati sono stati utilizzati nelle successive applicazioni numeriche.

I valori estremi associati a tempi di ritorno elevati sono in genere stimati applicando una distribuzione di probabilità alla serie di dati. In letteratura sono disponibili molte distribuzioni di probabilità, tecniche di selezione dei dati e di fitting e i risultati statistici risultano inevitabilmente dipendenti dalla metodologia selezionata.

Nel presente studio si è proceduto facendo riferimento ad una serie di diversi approcci, tutti opportunamente testati e confrontati, con la selezione del metodo che meglio approssimava i dati a disposizione.

5.1 Altezza d'onda significativa

In riferimento all'analisi statistica della variabile "altezza d'onda significativa", la procedura adottata è stata la seguente:

- estrazione, dalla serie temporale di dati orari in corrispondenza del punto P, di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 24 ore) sia all'evidenza che l'onda, tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (in genere pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti);

- *fit* della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati, distinti per settori direzionali. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. In particolare, il fit dei dati è stato fatto in riferimento alla distribuzione di tutti gli eventi indipendenti sopra una determinata soglia (metodo "Peak Over Threshold").

Tra i tipi di distribuzione sono stati testati: l'esponenziale, la lognormale, la Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri. Quest'ultima è risultata la più rappresentativa del campione a disposizione.

L'analisi è stata condotta con un approccio direzionale, per settori di 30° di ampiezza, così discretizzati:

- Settore A: caratterizzato da direzione di provenienza del moto ondoso compresa tra 145°N e 175°N (MWD media di riferimento: 160°N);

- Settore B: caratterizzato da direzione di provenienza del moto ondoso compresa tra 175°N e 205°N (MWD media di riferimento: 190°N);

- Settore C: caratterizzato da direzione di provenienza del moto ondoso compresa tra 205°N e 235°N (MWD media di riferimento: 220°N).

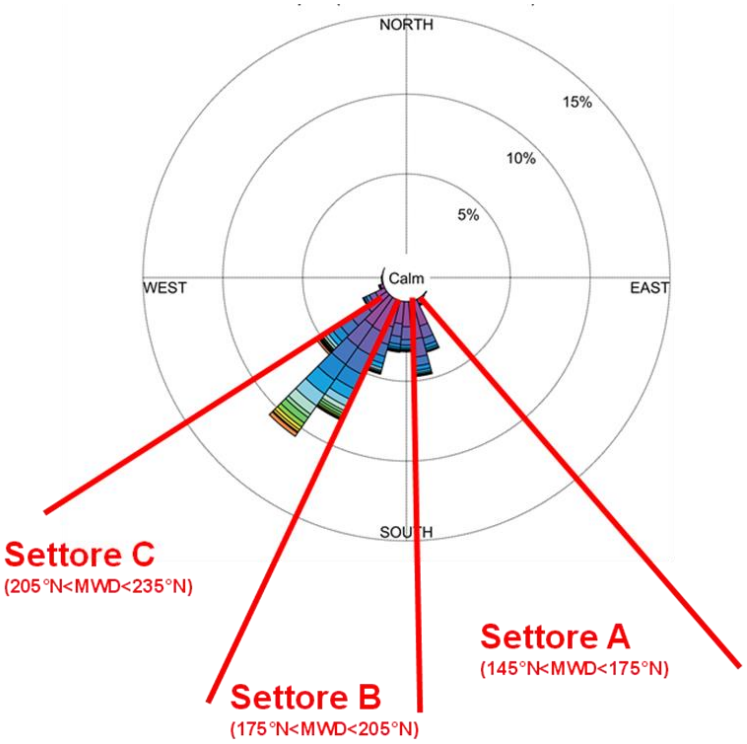


Figura 5-1 Suddivisione della rosa del clima ondoso per il punto P (533245m E, 4899097m N) in 3 settori A, B e C, di ampiezza pari a 30° ciascuno

Per ciascun settore, a partire dall'intera serie temporale ultra-quarantennale, si è proceduto ad estrarre un numero sufficientemente rappresentativo di eventi statisticamente indipendenti, caratterizzati dai valori più elevati di altezza d'onda significativa in riferimento allo specifico settore. Gli eventi di volta in volta selezionati per ciascun settore sono circa una sessantina (1.5 eventi / anno in media).

A seguire si riportano i grafici della distribuzione statistica per ognuno dei settori identificati e una tabella riassuntiva con le altezze d'onda significativa per assegnato tempo di ritorno.

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA
SETTORE 145°N-175°N

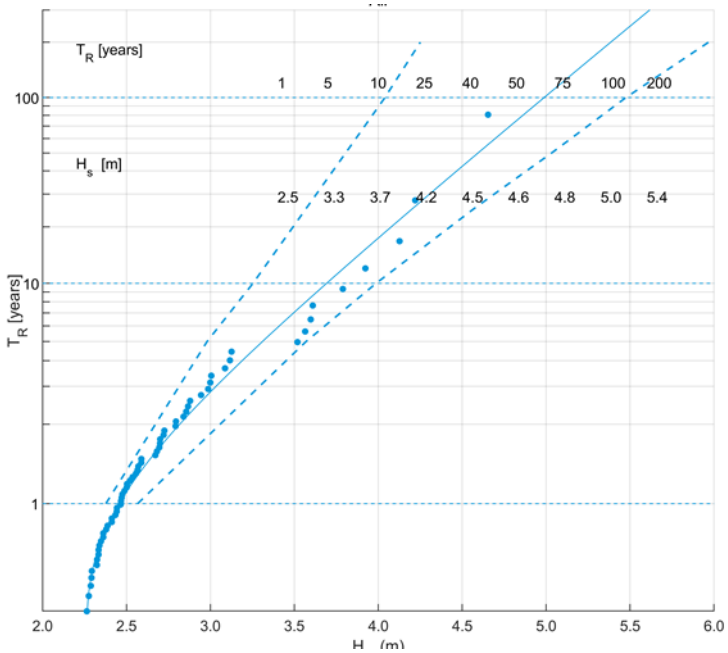


Figura 5-2 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 42 anni relative al settore direzionale A, comprensivo delle direzioni 145°-175° (MWD=160°N), estratte nel punto P

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA
SETTORE 175°N-205°N

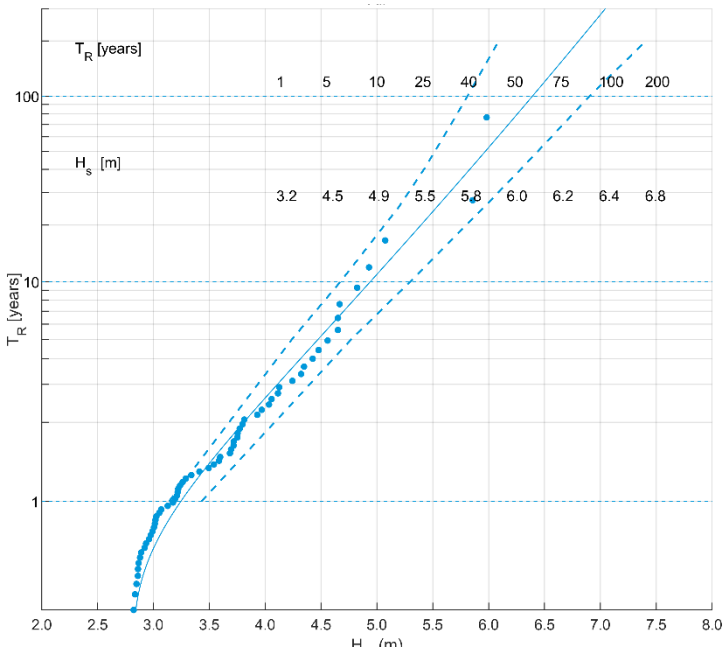


Figura 5-3 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 42 anni relative al settore direzionale B, comprensivo delle direzioni 175°-205° (MWD=190°N), estratte nel punto P

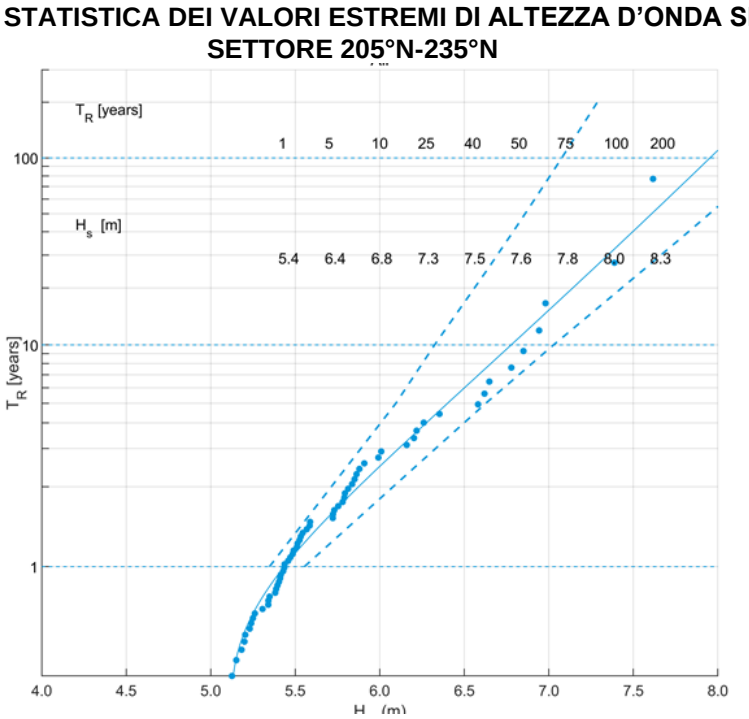


Figura 5-4 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 42 anni relative al settore direzionale C, comprensivo delle direzioni 205°-235° (MWD=220°N), estratte nel punto P

Tabella 5-1 Valori risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa Hs per i vari settori direzionali considerati

Hs[m]			
Tempo di ritorno [anni]	**Settore A** (MWD 160°N)	**Settore B** (MWD 190°N)	**Settore C** (MWD 220°N)
1	2.5	3.2	5.4
5	3.3	4.5	6.4
10	3.7	4.9	6.8
50	4.6	6.0	7.6

5.2 Livello marino

L'analisi statistica dei dati di livello del mare si basa sulla serie di livello idrometrico registrata dal mareografo di Genova. Il mareografo è posto all'interno del bacino portuale, pertanto è in grado di tenere in considerazione i seguenti contributi alla composizione del livello superficiale totale:

- contributo della marea astronomica;
- contributo della pressione atmosferica (effetto di "barometro inverso");
- contributo del vento (effetto "*wind setup*", ovvero schiacciamento della massa d'acqua verso terra in concomitanza con intensi venti provenienti dal mare).

Per la sua posizione, il mareografo non misura l'effetto dell'onda ("*wave setup*") che, su costa aperta e in bassi fondali, laddove si verifica il frangimento, può ulteriormente contribuire ad innalzare (localmente) la superficie marina.

La statistica dei livelli per assegnato tempo di ritorno è stata impostata sui 100 valori più elevati registrati dal mareografo nel periodo di dati a disposizione, ed ha fornito i valori riportati in Tabella 5-2.

Tabella 5-2 Valori di livello marino WL [m] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica

Livello marino	**TR 1 anno**	**TR 5 anni**	**TR 10 anni**	**TR 50 anni**
	WL [m]	**WL [m]**	**WL [m]**	**WL [m]**
Mareografo Genova	0.47	0.57	0.62	0.71

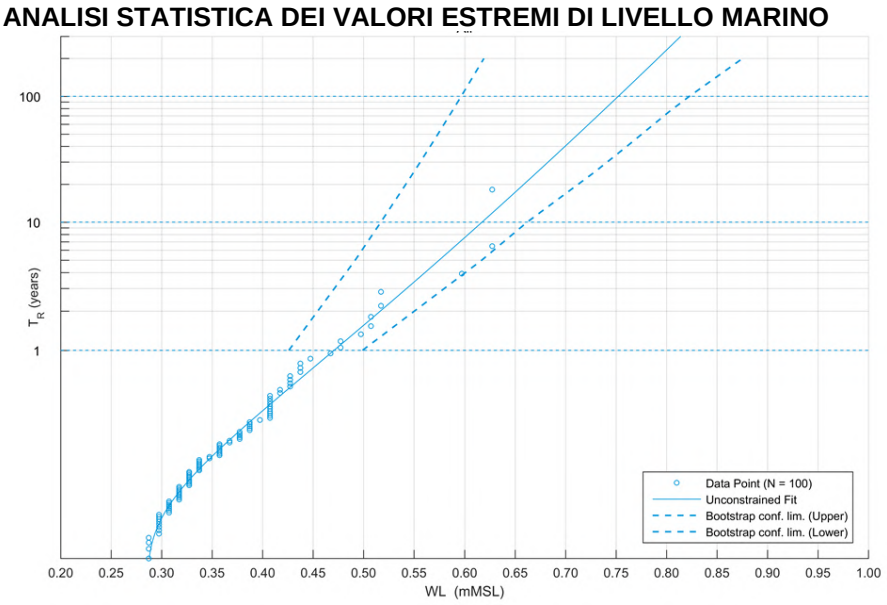


Figura 5-5 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Genova (2000-2019)

6 Simulazione delle dinamiche costiere

Al fine di identificare le principali dinamiche locali del sito di studio, il modello d'onda MIKE 21 SW (Spectral Waves) [3], già descritto in precedenza per la trasposizione da largo a riva, è stato integrato con il modulo idrodinamico MIKE 21 HD (Hydrodynamics) [4].

Il modulo MIKE 21 HD (Hydrodynamics), cuore del codice bidimensionale MIKE 21, simula le variazioni di livello e di corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni dei Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica. La versione Flexible Mesh utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale, al pari del modello d'onda, è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli.

Il modulo necessita di una serie di dati di input, che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- fattori di calibrazione (es. scabrezza, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (es. livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (es. oscillazioni di marea, portate);
- altre forzanti (es. campi di vento, radiation stress, apporti puntuali di portata).

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno, ma anche la direzione e il verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Per ciascun elemento di calcolo, è possibile ottenere le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- velocità di corrente e direzione;
- densità, temperatura e salinità (se rilevanti).

Una descrizione di dettaglio del modulo idrodinamico HD del codice di calcolo MIKE 21 è disponibile in Allegato C.

6.1 Dominio di calcolo, batimetria

Il modello integrato è stato implementato su un dominio di calcolo più ridotto rispetto a quello utilizzato per la propagazione dal largo verso riva, e risulta esteso longitudinalmente per circa 3.6 km e verso il largo per circa 1.7 km, includendo l'intera baia di Riva Trigoso.

Il risultato finale di interpolazione dei dati batimetrici a disposizione (par.3.3) è mostrato nell'immagine a seguire, in cui è rappresentata la batimetria per l'intera estensione del dominio.

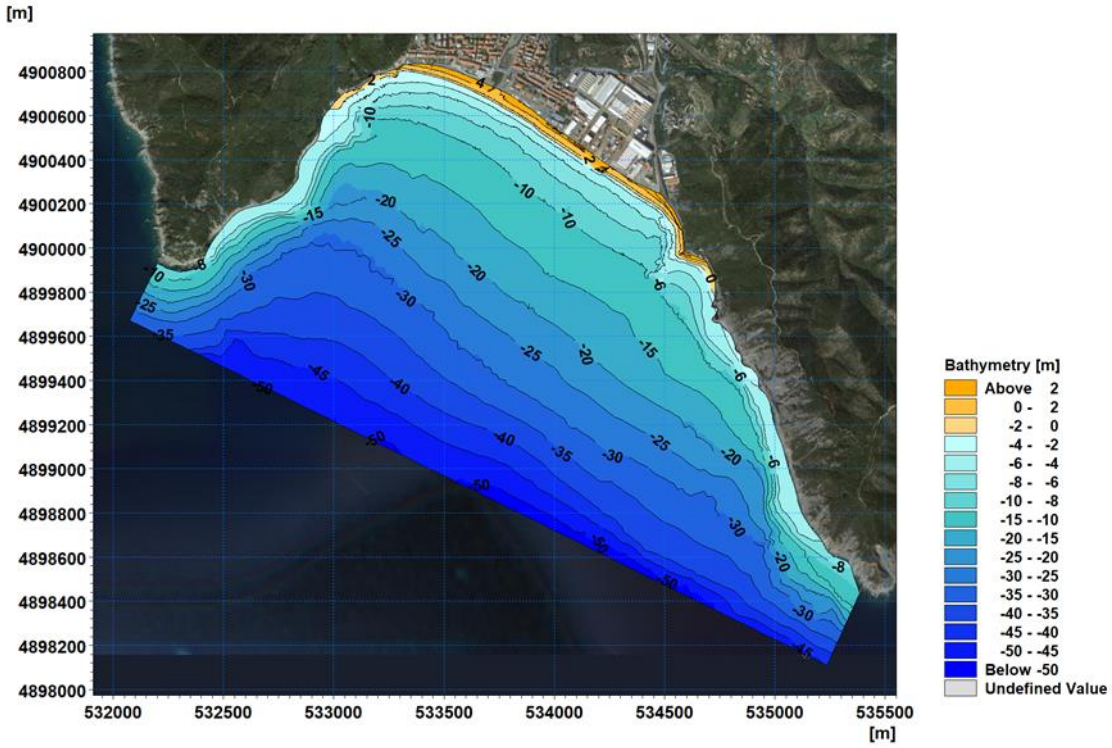


Figura 6-1 Batimetria del modello di dettaglio ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

Al fine di rappresentare opportunamente la variabilità batimetrica del sito al dettaglio richiesto per una rappresentazione della propagazione del moto ondoso e delle principali dinamiche su profondità limitate, e garantire allo stesso tempo la sostenibilità dei tempi computazionali, l'area è stata suddivisa in differenti sottodomini, ognuno caratterizzato da una risoluzione (intesa come lato del triangolo della mesh) differente.

Nello specifico, si passa da una risoluzione di circa 30 m nella zona più al largo, a una zona intermedia a 10 m, sino a 3 metri per la zona caratterizzata da profondità inferiori ai 10 m (Figura 6-2).

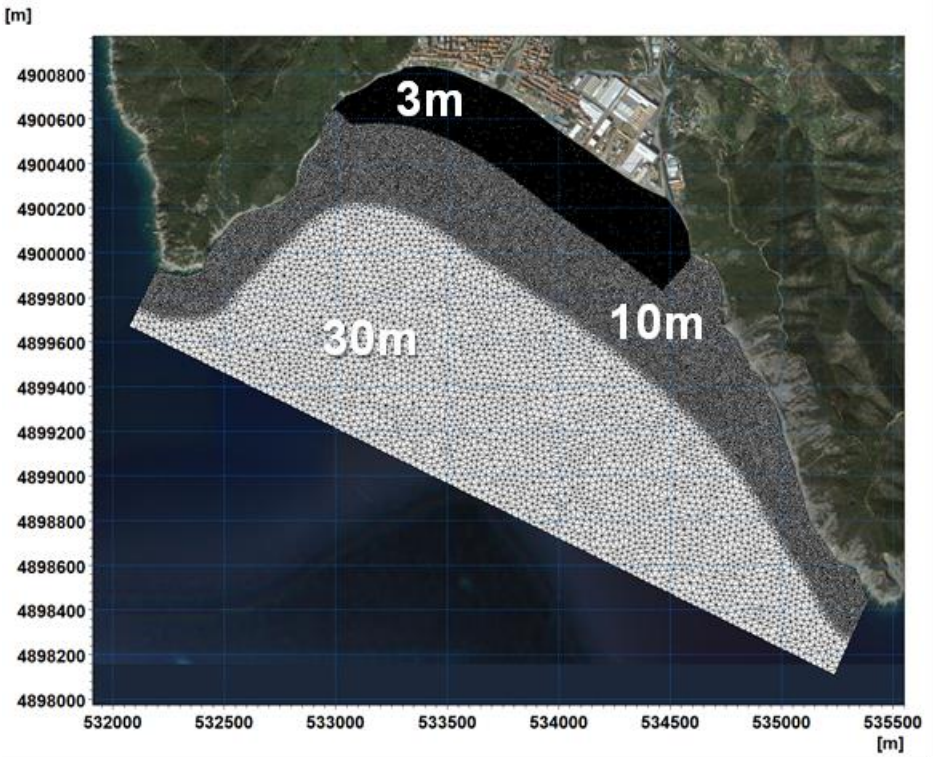


Figura 6-2 Risoluzione adottata nel modello di dettaglio: 30 m per le profondità maggiori; 10 m per le batimetriche comprese tra -20 m e -10 m; 3 m per le profondità inferiori ai 10 m

La scelta di un aumento incrementale di risoluzione verso costa consente la rappresentazione dettagliata del litorale e permette la riproduzione delle dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro.

La mesh di calcolo del modello è complessivamente costituita da circa 172’000 elementi.

6.2 Selezione delle condizioni d’onda rappresentative

Il modello di dettaglio integrato onda-corrente, come anticipato, è stato utilizzato per l’identificazione e l’analisi delle principali dinamiche sottocosta in prossimità del litorale di Riva Trigoso.

A tal fine è stato preliminarmente necessario selezionare una serie di condizioni d’onda rappresentative. A partire dai risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale di dati di onda e vento di largo (capitolo 4), dall’estrazione del clima ondoso sottocosta nel punto denominato P (Figura 4-6) e dalla relativa analisi statistica (capitolo 5), sono stati selezionati per i successivi approfondimenti modellistici tre onde di riferimento, una per ciascuno dei principali settori di provenienza identificati (Figura 5-1).

Per ciascun settore direzionale sono state simulate le onde caratterizzate da un’altezza d’onda significativa Hs con associato tempo di ritorno pari ad 1 anno, in rappresentazione di un evento poco frequente (anche se non estremo) con una altezza d’onda tale da innescare dinamiche litoranee non trascurabili in termini di corrente e associato trasporto sedimentario.

Ai valori di altezza d’onda significativa Hs per TR 1 anno sono stati associati i valori di periodo di picco Tp, stimati attraverso le relazioni Hs-Tp definite sulla base del campione dei dati disponibili per ogni settore direzionale di 30°.

A titolo esemplificativo, in Figura 6-3 è riportato il grafico relativo al settore B, con la nuvola dei punti rappresentanti le condizioni Hs-Tp per la serie ultra-quarantennale di dati a disposizione per gli eventi provenienti dal settore 175°N - 205°N e le relative curve di fit dei dati al 5° - 50° e 95° percentile.

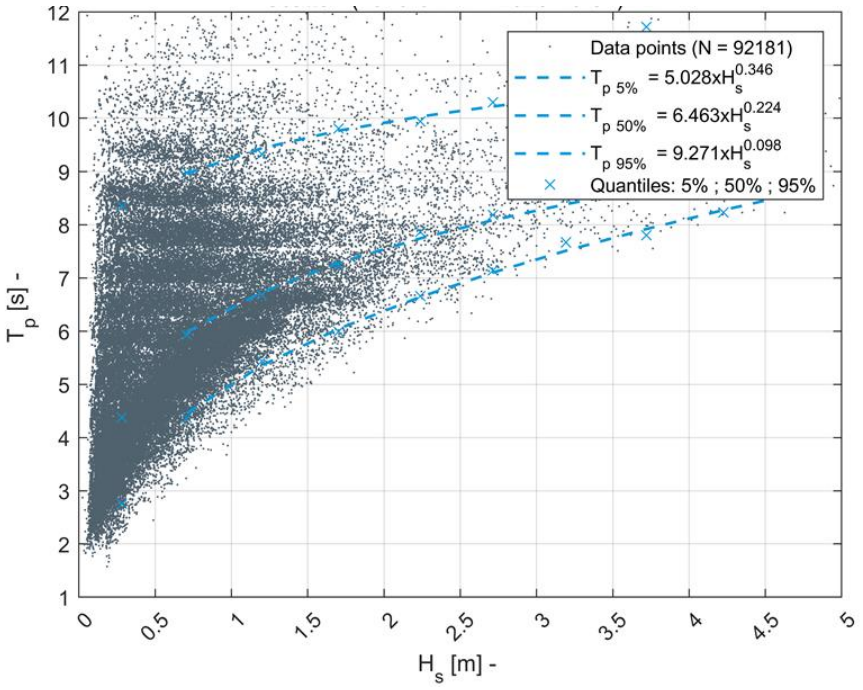


Figura 6-3 Dati di altezza d'onda significativa Hs e il periodo di picco Tp per gli eventi appartenenti al settore B con direzione media di provenienza MWD compresa tra 175°N e 205°N

Nella tabella a seguire vengono riassunte le caratteristiche delle condizioni d'onda selezionate. Il Tp associato è stato calcolato sulla base della curva di fit al 50° percentile.

Tabella 6-1 Elenco delle tre condizioni d'onda selezionate per il modello 2D di dettaglio (onda e idrodinamica locale)

Condizione d'onda	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°]
A1	2.5	7.7	160°N
B1	3.2	8.4	190°N
C1	5.4	9.5	220°N

Si precisa che alle condizioni d'onda sopra riportate, nelle simulazioni modellistiche descritte in dettaglio nel seguito, è stato cautelativamente associato un livello del mare di riferimento pari a 0.47 m, corrispondente ad un tempo di ritorno pari ad un anno (Tabella 5-2).

6.3 Risultati del modello integrato onda-corrente nello stato attuale

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso (altezza, direzione e periodo) ed idrodinamiche (livelli, correnti) in tutti i punti del dominio di calcolo nella configurazione di stato attuale.

I risultati del modello, riportati a seguire, fanno principalmente riferimento a:

- mappe di altezza d'onda e direzione di provenienza;
- mappe di velocità e direzione di corrente.

6.3.1 Risultati del modello d'onda di dettaglio – stato attuale

A seguire si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa, per le tre condizioni d'onda considerate, sia per l'intero dominio di calcolo che per il dettaglio della zona del cantiere navale di Fincantieri.

Dall'analisi dei risultati si evince che le onde con direzione media di propagazione MWD pari a 160°N (Figura 6-4), raggiungono la spiaggia avendo subito una significativa dissipazione indotta dai fenomeni di rifrazione, shoaling e frangimento, per effetto dell'orientazione della costa rispetto al fronte d'onda (rifrazione) e per l'interazione con i bassi fondali (shoaling e frangimento). I vettori evidenziano la rotazione significativa che il moto ondoso compie nell'avvicinamento a riva.

Per le condizioni d'onda provenienti da Mezzogiorno (Figura 6-5) si riscontrano riduzioni più limitate nei valori di altezza d'onda, risultando minore l'effetto di rifrazione. La rapida variazione cromatica nelle mappe di distribuzione dell'altezza d'onda individua, in prossimità della linea di riva, la linea dei frangenti.

Per eventi caratterizzati da MWD pari a 220°N (Figura 6-6, Libeccio), la direzione di incidenza, praticamente perpendicolare alla linea di riva, inibisce la rifrazione e si osserva una riduzione nei valori di altezza d'onda significativa solo per effetto della quota del fondale (shoaling e frangimento).

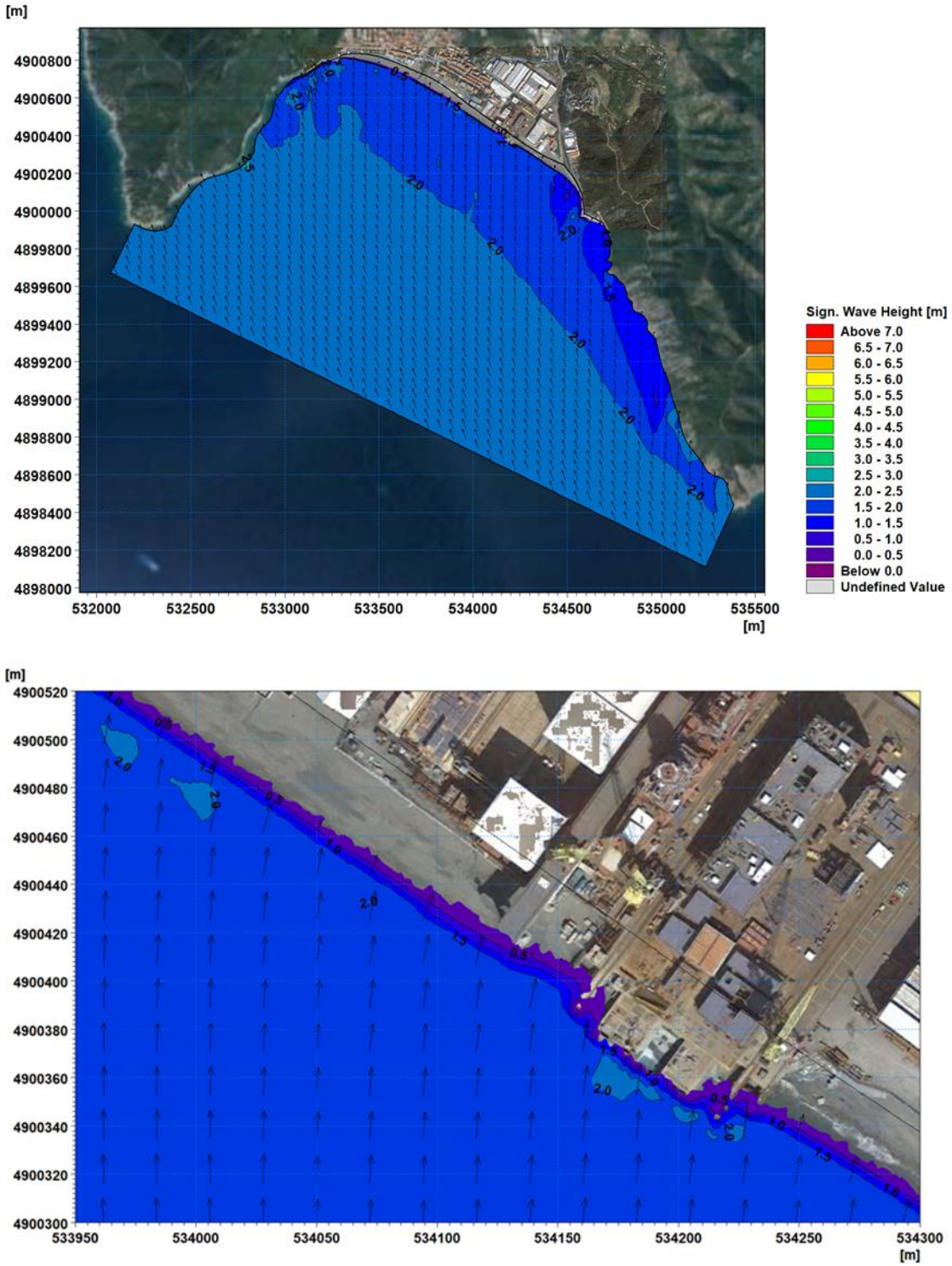


Figura 6-4 Stato attuale: distribuzione dell'altezza d'onda nella baia di Riva Trigoso, sull'intero dominio (in alto) e dettaglio (in basso), per la condizione A1 con Hs=2.5 m, Tp=7.7 s, caratterizzata da MWD=160°N

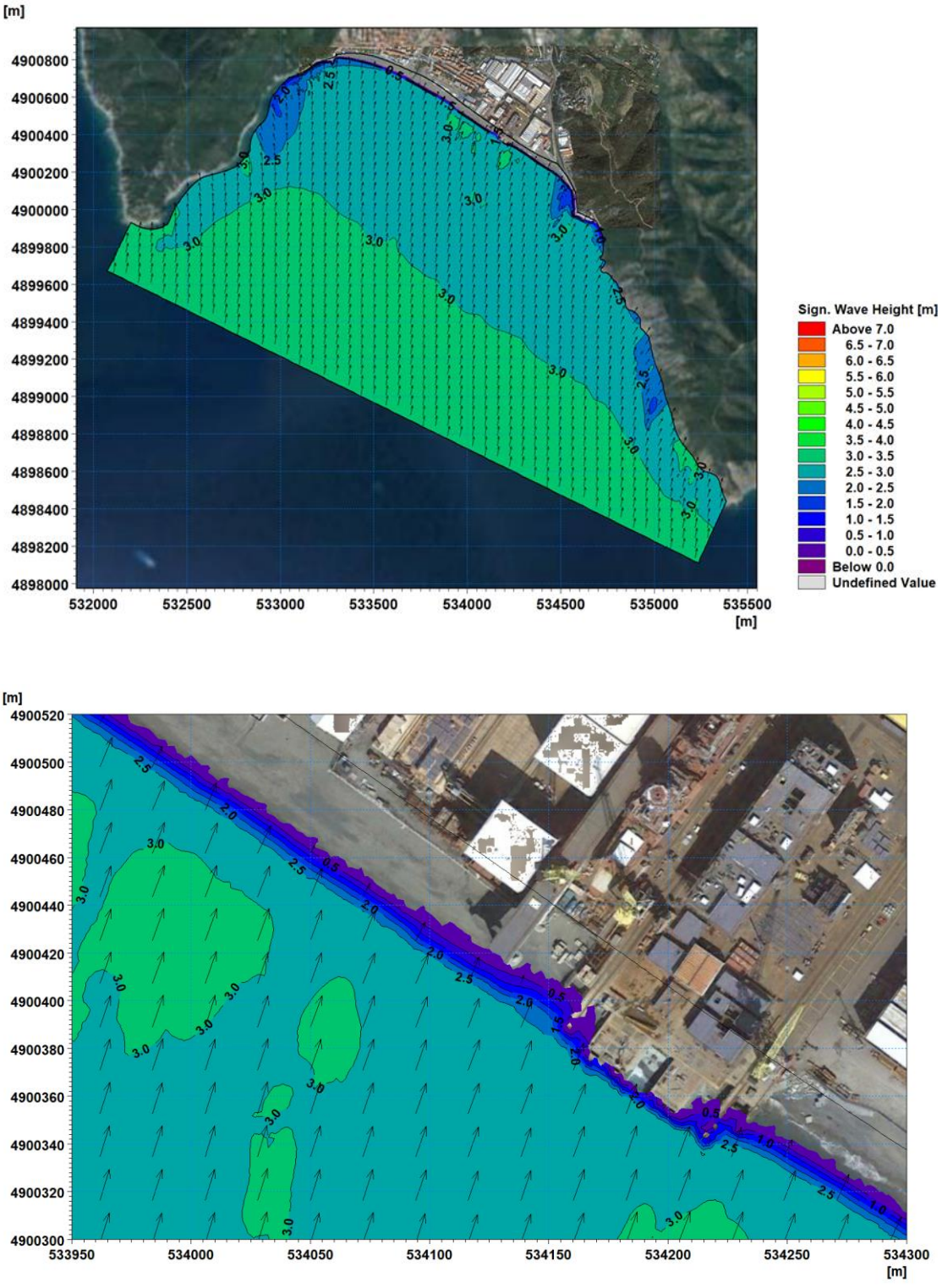


Figura 6-5 Stato attuale: distribuzione dell'altezza d'onda nella baia di Riva Trigoso, sull'intero dominio (in alto) e dettaglio (in basso) per la condizione B1 con Hs=3.2 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=190°N

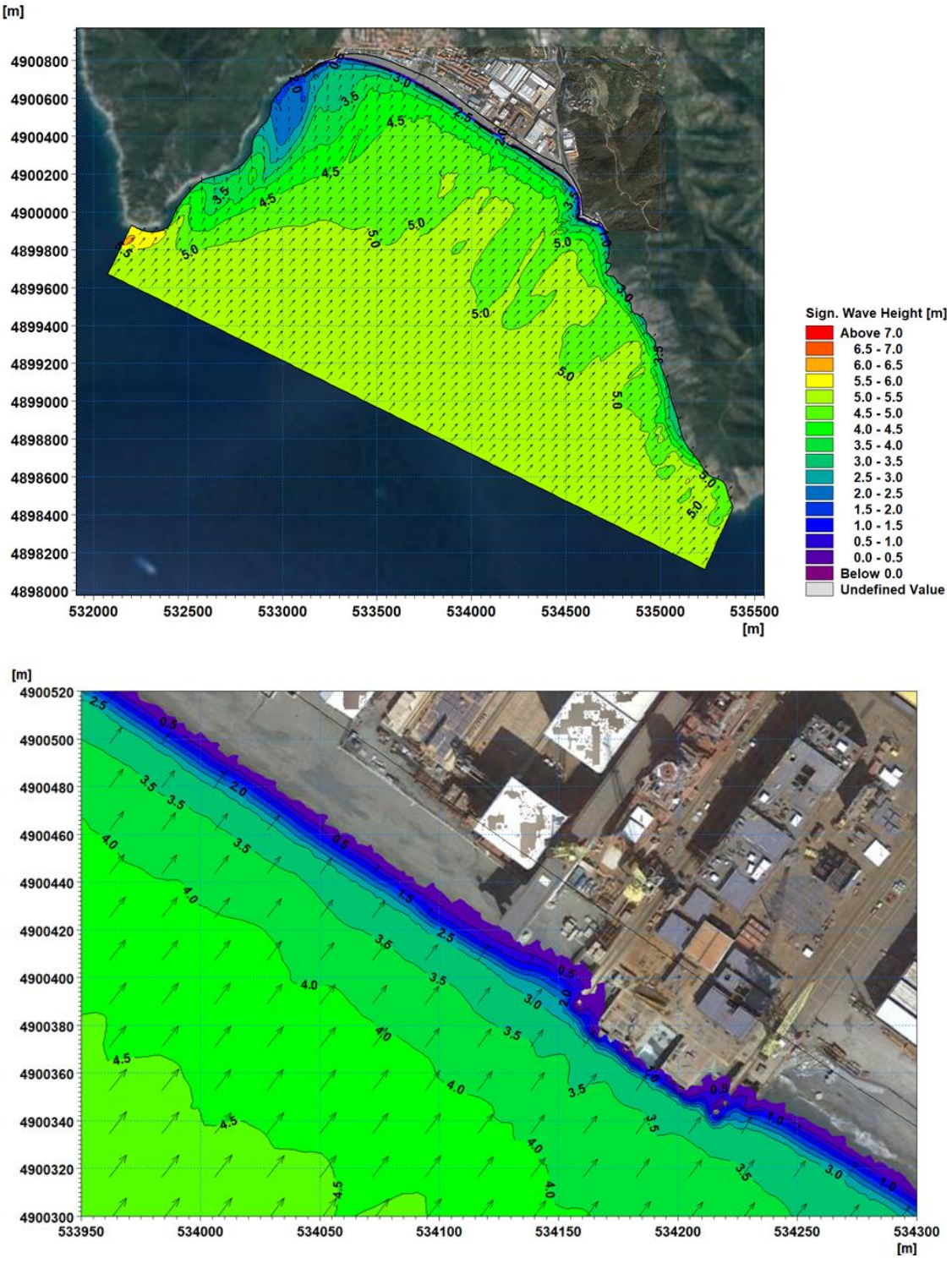


Figura 6-6 Stato attuale: distribuzione dell'altezza d'onda nella baia di Riva Trigoso, sull'intero dominio (in alto) e dettaglio (in basso) per la condizione C1 con Hs=5.4 m, Tp=9.5 s, caratterizzata da MWD=220°N

6.3.2 Risultati del modello idrodinamico – stato attuale

A seguire si riportano le mappe di velocità e direzione di corrente per le condizioni d'onda selezionate, che forniscono una buona rappresentazione dell'attuale circolazione locale.

Le correnti litoranee sono generate per effetto dei gradienti dei *radiation stress* indotti dalle onde sul fondo, massimi in corrispondenza del frangimento. Le condizioni di moto ondoso, a seconda della loro intensità e direzione (e quindi della localizzazione della fascia di frangenti, più o meno spostata verso largo), sono in grado di generare correnti in una fascia più o meno prossima alla costa. La direzione prevalente della corrente risulta invece influenzata dall'angolo formato tra il fronte d'onda e le isobate.

I risultati modellistici della condizione d'onda proveniente da Scirocco (condizione A1) evidenziano la formazione di un flusso di corrente con direzione da levante verso ponente. Tale ramo della corrente ne incontra un altro, caratterizzato da direzione opposta, in corrispondenza del piccolo pennello in massi presente al limite occidentale della spiaggia. La combinazione dei due flussi genera una debole corrente di ritorno (rip), orientata verso il largo. La parte più attiva della corrente *longshore* raggiunge valori di intensità di corrente massimi fino a circa 1.8-2.0 m/s.

In prossimità del cantiere navale si osserva una lieve deviazione nella direzione del flusso, che comunque è in grado di aggirare agevolmente la discontinuità della linea di riva rappresentata dall'infrastruttura. Superato l'ostacolo, la corrente prosegue parallelamente alla riva in direzione Nord-Ovest.

Nel caso di eventi da Mezzogiorno, condizione B1, si osserva ancora la generazione di una corrente litoranea da levante verso ponente, attiva su una porzione di spiaggia sommersa di circa 40 m, con intensità massime fino a 2.0 – 2.2 m/s (Figura 6-8). In questo caso il flusso di corrente principale è caratterizzato da maggior larghezza e intensità rispetto alle condizioni A1.

Nell'area Fincantieri il flusso aggira anche in questo caso le opere e poi prosegue parallelo alla linea di riva. In corrispondenza dell'impianto si osserva una locale diminuzione delle intensità di corrente.

Per le condizioni d'onda caratterizzate da MWD=220°N, decisamente più frequenti ed intense, la corrente litoranea presenta una direzione prevalente da ponente a levante fino al limite orientale della spiaggia, ove incontra un flusso caratterizzato da direzione opposta; la loro combinazione genera una corrente di rip diretta verso Sud-Ovest (Figura 6-9).

In corrispondenza del cantiere navale si osserva una locale deviazione della direzione principale che anche in questo caso aggira l'infrastruttura e tende a riallinearsi rapidamente parallela alla linea di riva. In questo caso il flusso presenta una direzione da Nord-Ovest verso Sud-Est.

A seguire si riportano le mappe di intensità di corrente di tutte le condizioni d'onda simulate.

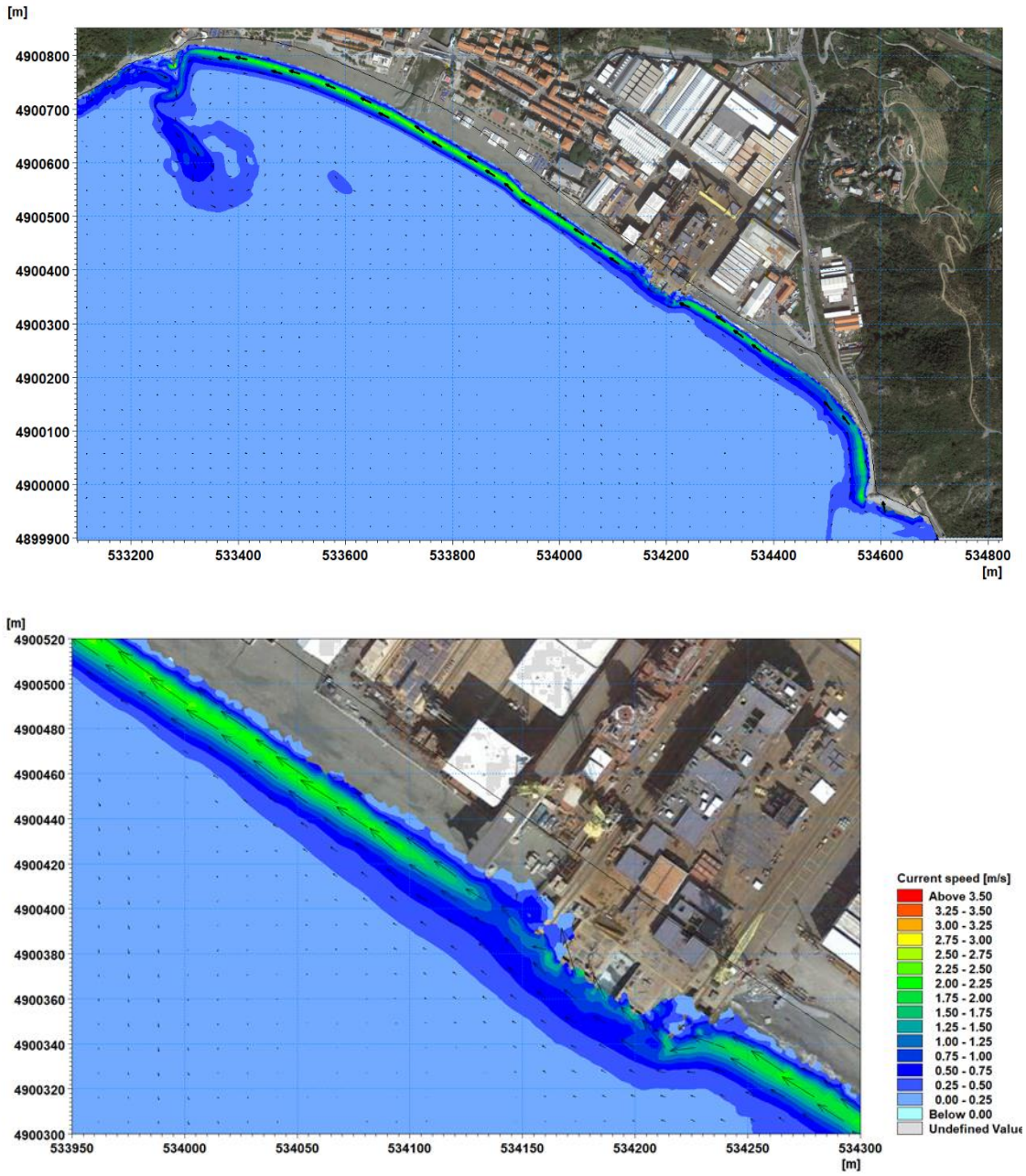


Figura 6-7 Stato attuale: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sul litorale di Riva Trigoso (in alto) e nell'area di pertinenza del cantiere navale di Fincantieri (in basso), per la condizione A1 con Hs=2.5 m, Tp=7.7 s, caratterizzata da MWD=160°N

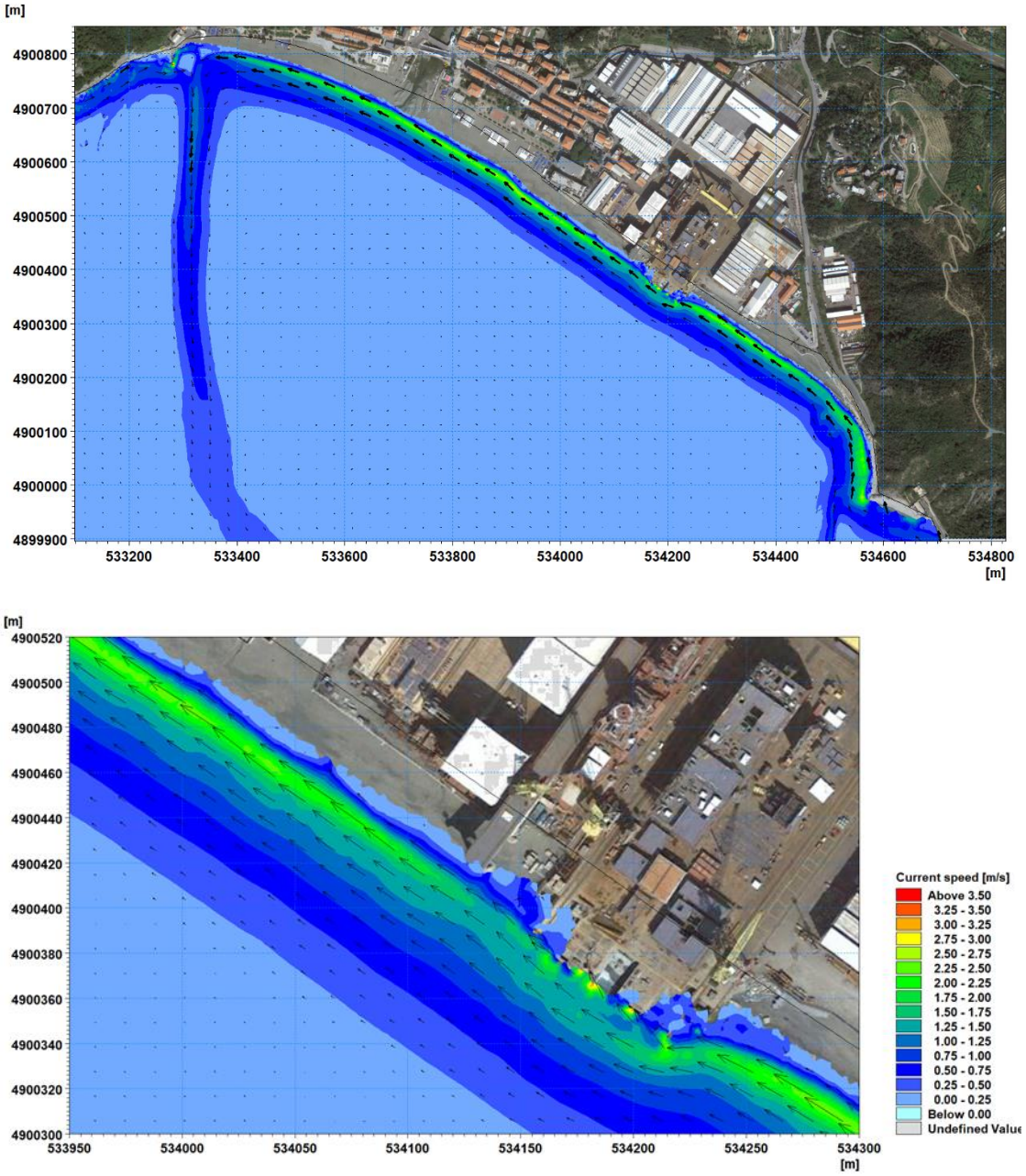


Figura 6-8 Stato attuale: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sul litorale di Riva Trigoso (in alto) e nell'area di pertinenza del cantiere navale di Fincantieri (in basso), per la condizione B1 con Hs=3.2 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=190°N

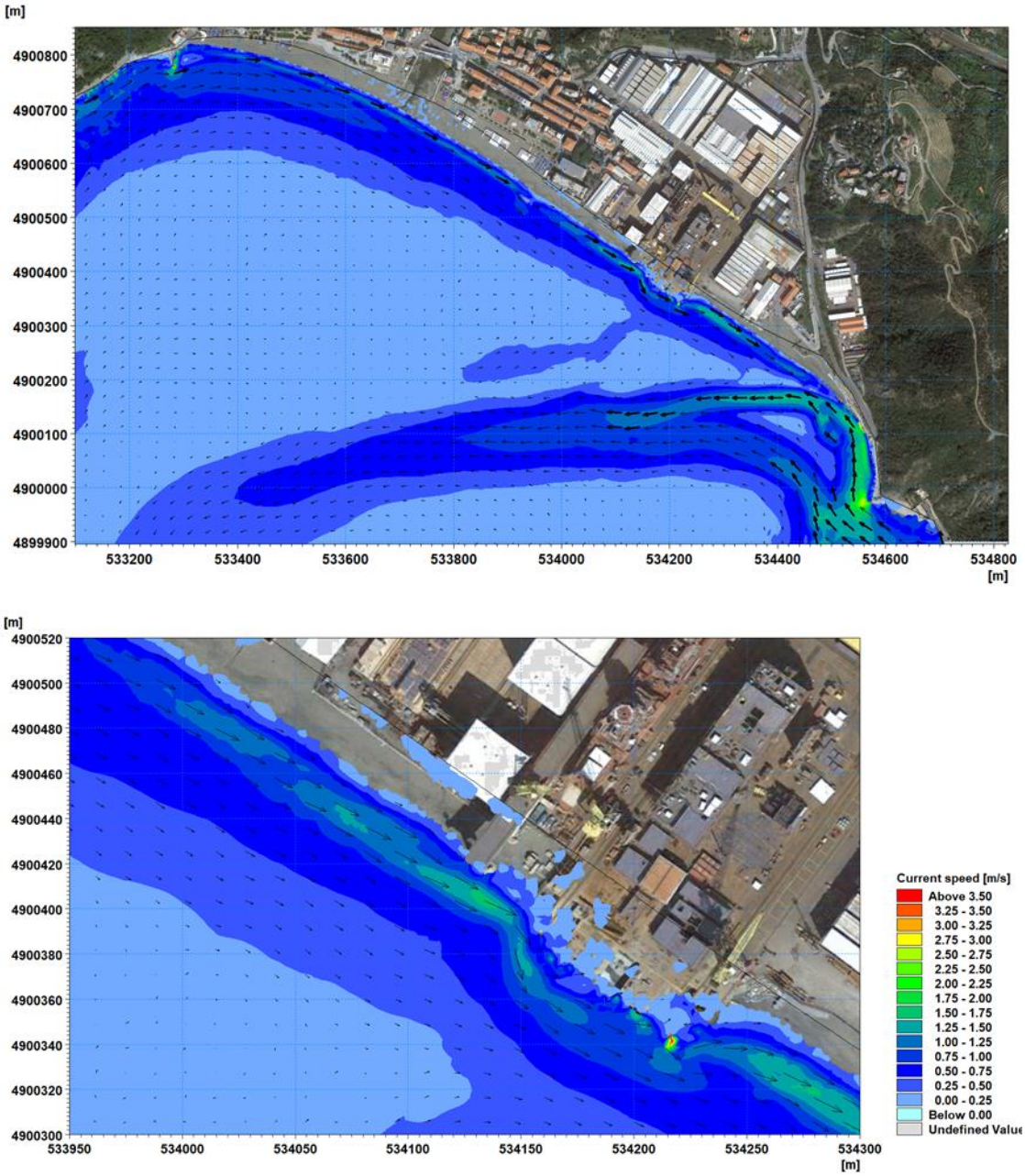


Figura 6-9 Stato attuale: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sul litorale di Riva Trigoso (in alto) e nell'area di pertinenza del cantiere navale di Fincantieri (in basso), per la condizione C1 con Hs=5.4 m, Tp=9.5 s, caratterizzata da MWD=220°N

6.4 Risultati del modello integrato onda-corrente nella configurazione progettuale

Al fine di valutare gli eventuali effetti dell'intervento in progetto sulla dinamica litoranea, si è proceduto con la riproduzione delle medesime condizioni di onda simulate con lo stato attuale, sulla configurazione comprensiva delle nuove opere previste.

Rimandando agli elaborati tecnici per i dettagli della nuova configurazione prevista per il cantiere, si riporta nell'immagine a seguire lo schema progettuale con, evidenziati in rosso, i nuovi elementi previsti per la realizzazione del nuovo pontile necessario a sviluppare la nuova linea di varo dello stabilimento. Al fine di razionalizzare gli spazi dello stabilimento è inoltre prevista la demolizione dei piloni e del piano di scorrimento in spiaggia.

Si specifica che l'intervento sarà realizzato in continuità dell'esistente, con la realizzazione delle strutture a pontile con tecnologia del tutto analoga rispetto all'attuale infrastruttura e che le nuove opere consentiranno l'accesso dal mare con chiatte, con ponte allineato con il piano dello scalo e il successivo trasferimento delle navi in fase di varo, tramite l'utilizzo di carrelli.

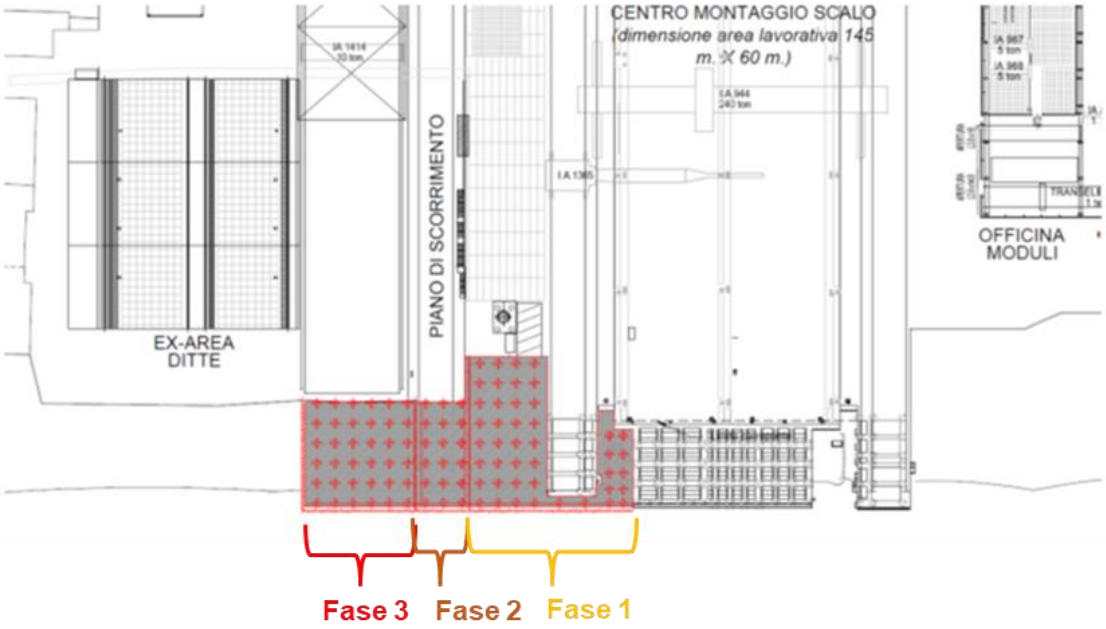


Figura 6-10 Schema progettuale dell'intervento previsto per la realizzazione del nuovo pontile necessario a sviluppare la nuova linea di varo dello stabilimento Fincantieri di Riva Trigoso (evidenziate in colore rosso), con la differenziazione delle tre fasi realizzative previste per il completamento dell'opera

Dopo aver costruito una mesh di calcolo comprensiva delle opere in progetto si è proceduto con la simulazione delle condizioni d'onda A1, B1 e C1 nella nuova configurazione.

Si specifica che per questo modello integrato di onda e corrente si è proceduto con la riproduzione della configurazione di progetto completa, comprensiva delle strutture previste in tutte e tre le fasi di realizzazione proposte (stralci esecutivi) (Figura 6-10), dal momento che la realizzazione parziale delle opere (ad esempio realizzazione fase 1+ fase 2) costituisce una configurazione intermedia tra quella di stato attuale e quella progettuale finale, con risultati attesi qualitativamente del tutto analoghi a quelli della configurazione completa.

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso (altezza, direzione e periodo) ed idrodinamiche (livelli, correnti) in tutti i punti del dominio di calcolo. I risultati del modello, riportati nei paragrafi seguire, fanno principalmente riferimento a:

- mappe di altezza d'onda e direzione di provenienza;
- mappe di velocità e direzione di corrente.

6.4.1 Risultati del modello d'onda di dettaglio – configurazione di progetto

A seguire si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa, per le tre condizioni d'onda considerate, per il dettaglio della zona del cantiere navale di Fincantieri, risultando la distribuzione sull'intero paraggio identica a quella rappresentata e riportata per lo stato attuale.

Anche focalizzando l'attenzione sulla zona del cantiere non si osservano variazioni significative nella distribuzione dell'altezza significativa nei tre scenari A1, B1 e C1. Il modesto aggetto dell'opera e le caratteristiche delle strutture sopra il livello del mare non comportano modifiche nella propagazione dell'onda da largo verso riva.

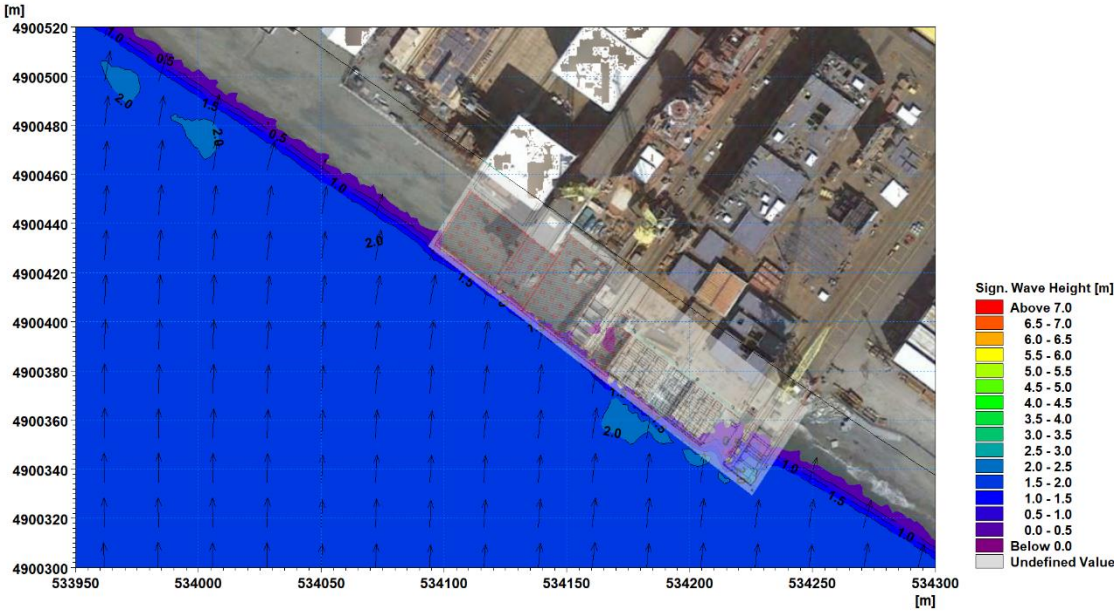


Figura 6-11 Configurazione di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sulla zona del cantiere navale, per la condizione A1 con Hs=2.5 m, Tp=7.7 s, caratterizzata da MWD=160°N

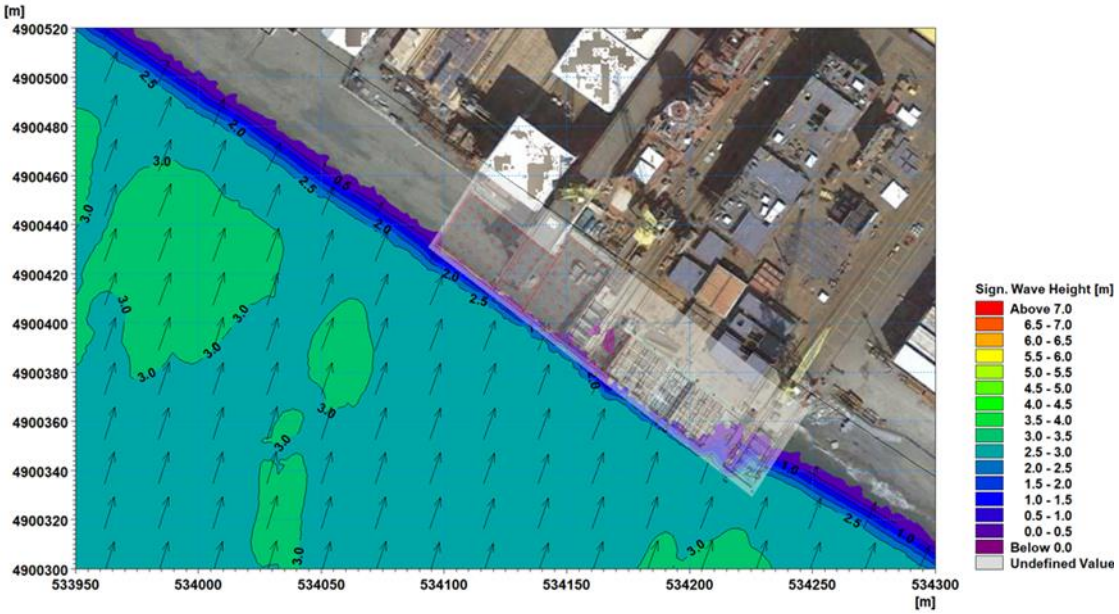


Figura 6-12 Configurazione di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sulla zona del cantiere navale, per la condizione B1 con Hs=3.2 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=190°N

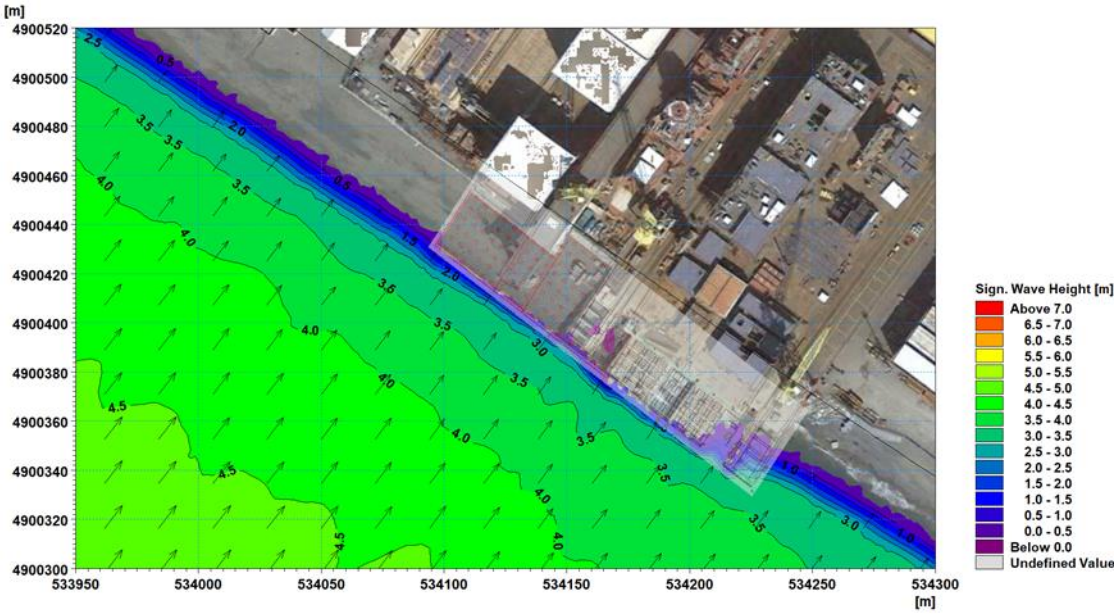


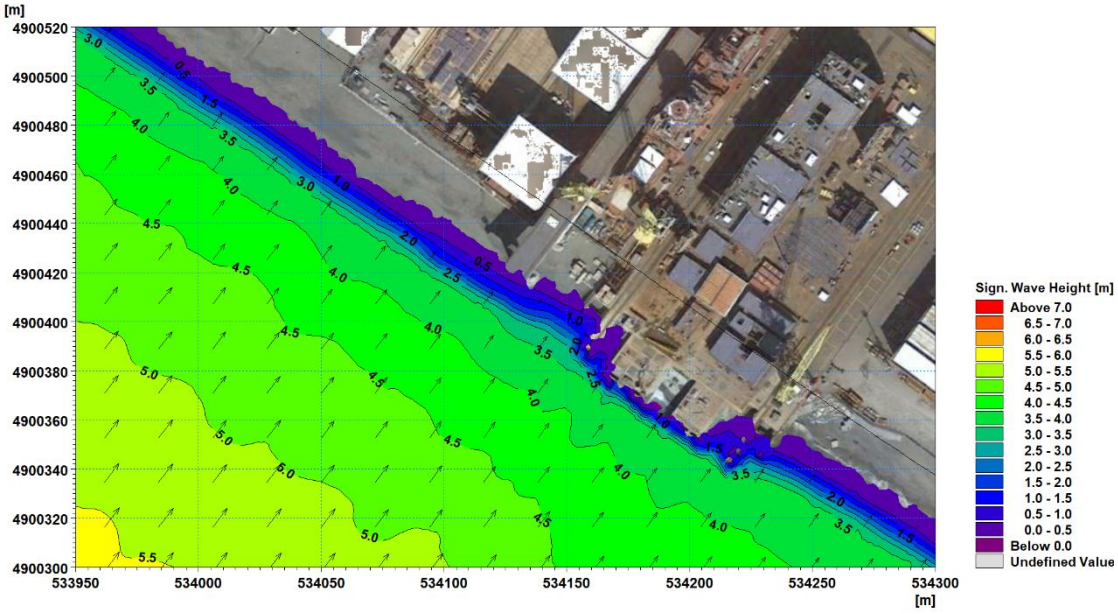
Figura 6-13 Configurazione di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sulla zona del cantiere navale, per la condizione C1 con Hs=5.4 m, Tp=9.5 s, caratterizzata da MWD=220°N

Per completezza d'indagine si è inoltre proceduto al confronto tra configurazione attuale e di progetto anche in riferimento ad un evento più critico, caratterizzato da tempo di ritorno pari a 50 anni, con associato un livello del mare maggiore, WL=0.71 m (Tabella 5-2).

A seguire si riportano a confronto le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda per un evento di mareggiata da Libeccio caratterizzato da altezza d'onda Hs pari a 7.6 m nel punto P (Tabella 5-1), periodo di picco Tp pari a 11.3 s e direzione media di propagazione MWD 220°N.

In questo caso è più evidente una lieve variazione tra configurazione attuale e di progetto, conseguente alla presenza delle nuove opere e al loro ingombro, ma le variazioni nella propagazione dell'onda risultano comunque limitate all'area cantieristica.

STATO ATTUALE



STATO PROGETTO

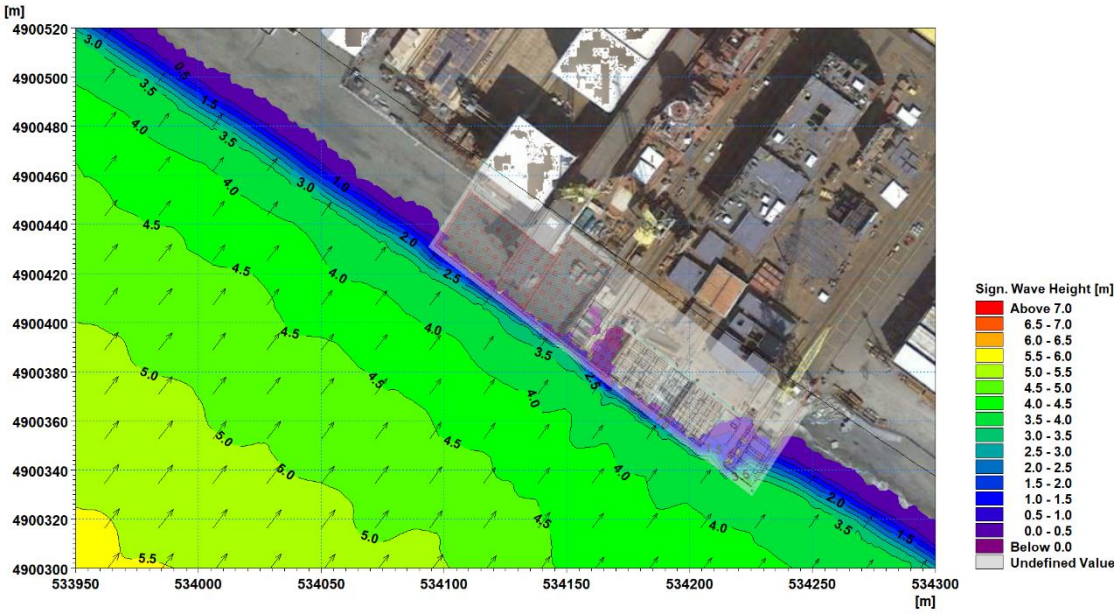


Figura 6-14 Confronto tra la configurazione di stato attuale (sopra) e quella di progetto (sotto) della distribuzione dell'altezza d'onda nella zona del cantiere navale, per la condizione di onda con associato tempo di ritorno pari a 50 anni con Hs=7.6 m, Tp=11.3 s, caratterizzata da MWD=220°N

6.4.2 Risultati del modello idrodinamico – configurazione di progetto

L'analisi delle mappe delle intensità di corrente risultanti dalle simulazioni degli scenari A1-B1-C1 per la configurazione di progetto evidenzia l'assenza di sostanziali interferenze nella circolazione conseguenti all'inserimento delle nuove strutture previste.

Analogamente a quanto osservato per lo stato attuale, la corrente tende ad aggirare la discontinuità della linea di riva rappresentata dai pontili del cantiere, riallineandosi parallelamente alla spiaggia appena superato l'ingombro delle opere.

Le direzioni dei flussi di corrente nei vari scenari riprodotti si mantengono pressochè analoghi a quelli dello stato attuale; qualche minima locale variazione si osserva sulle intensità delle corrente. L'allargamento dell'area cantieristica nello scenario di progetto comporta infatti una lieve diminuzione nei valori delle velocità in prossimità dello stabilimento.

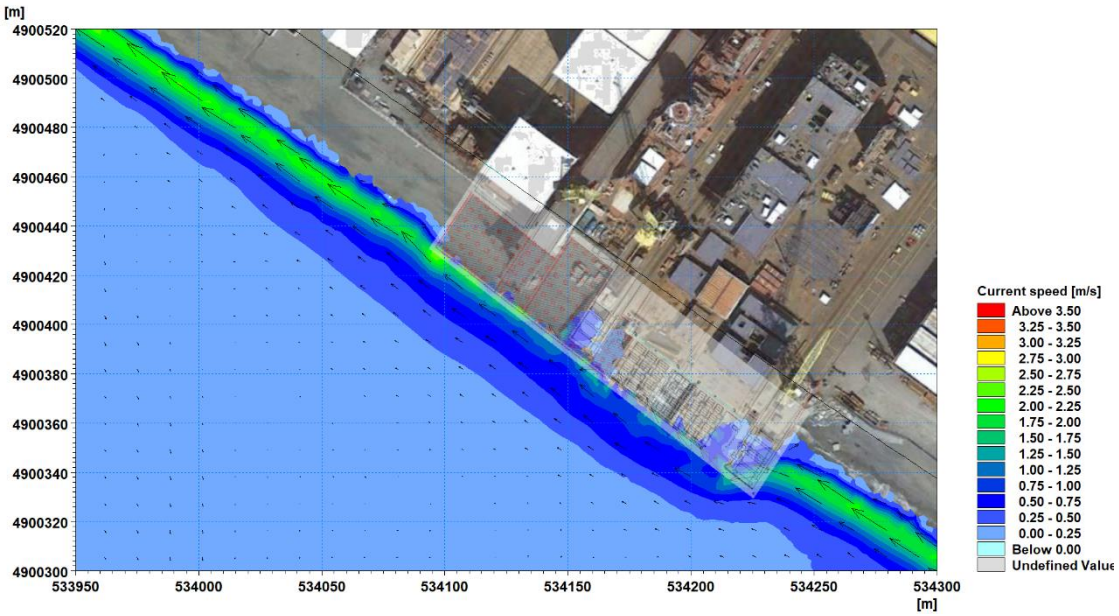


Figura 6-15 Configurazione di progetto: mappa della distribuzione delle intensità di corrente nell'area di pertinenza del cantiere navale di Fincantieri, per la condizione A1 con Hs=2.5 m, Tp=7.7 s, caratterizzata da MWD=160°N

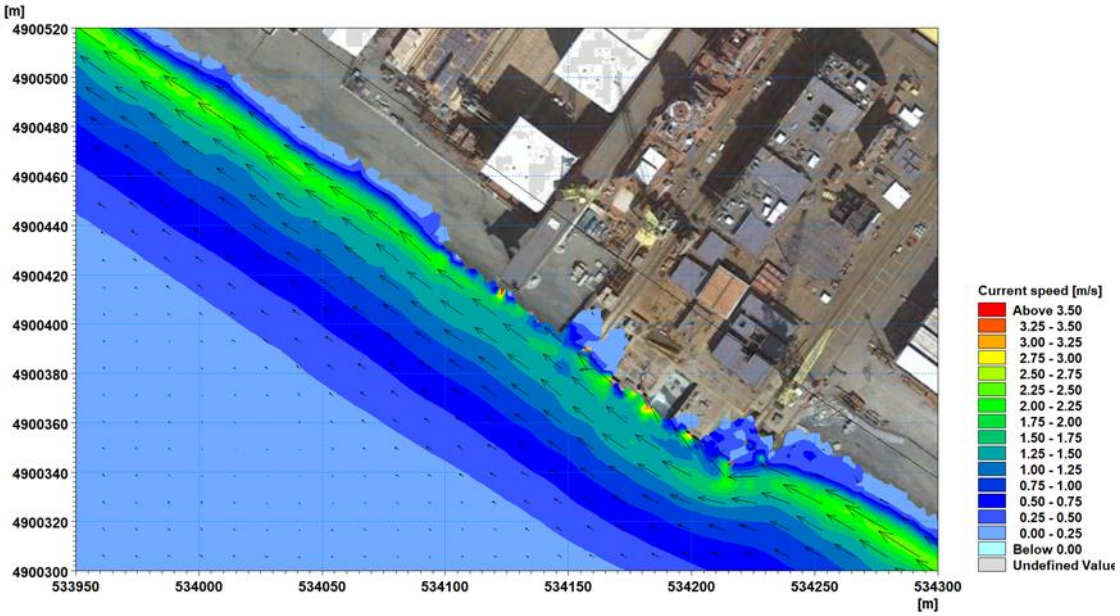


Figura 6-16 Configurazione di progetto: mappa della distribuzione delle intensità di corrente nell'area di pertinenza del cantiere navale di Fincantieri, per la condizione B1 con Hs=3.2 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=190°N

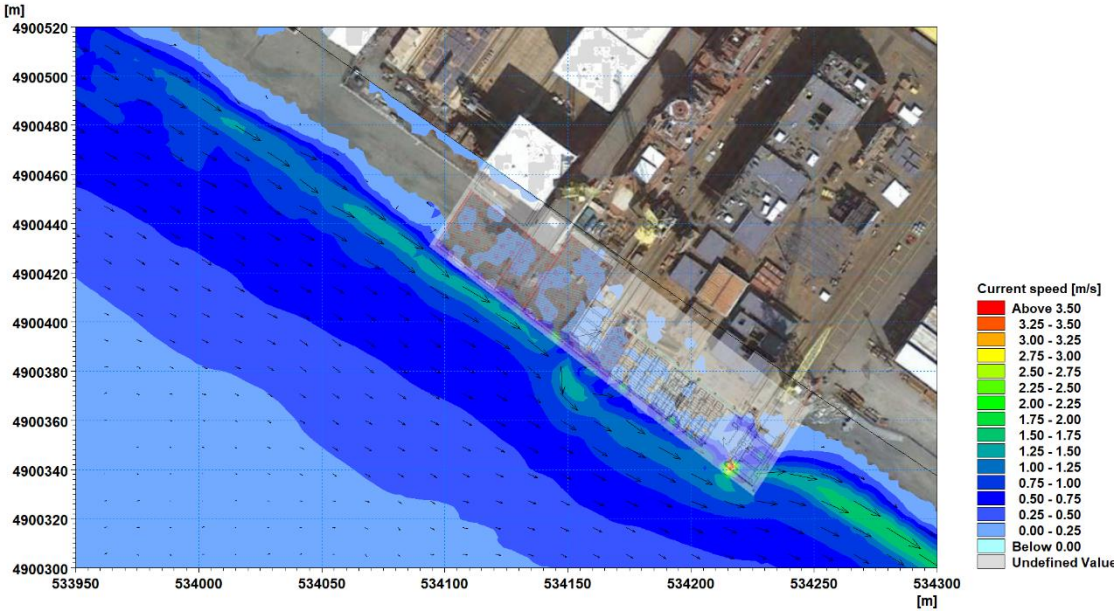


Figura 6-17 Configurazione di progetto: mappa della distribuzione delle intensità di corrente nell'area di pertinenza del cantiere navale di Fincantieri, per la condizione C1 con Hs=5.4 m, Tp=9.5 s, caratterizzata da MWD=220°N

7 Analisi del trasporto litoraneo

Per la quantificazione del trasporto sedimentario locale in corrispondenza del litorale di Riva Trigoso è stato impiegato il modello numerico LITDRIFT [5], parte del pacchetto Littoral Processes (LITPROC) di DHI (Allegato D).

Il modulo LITDRIFT permette di simulare la distribuzione delle altezze d'onda, del *set-up* e del *set-down*, delle correnti *longshore* e del trasporto di sedimenti non coesivi lungo profili trasversali alla costa. LITDRIFT utilizza il modulo STP per calcolare la distribuzione trasversale del trasporto longitudinale di sedimenti (dato dalla somma del trasporto di sedimenti al fondo ed in sospensione) per un determinato profilo batimetrico, per onde regolari e irregolari. Il trasporto al fondo viene calcolato facendo riferimento allo *shear stress* istantaneo che si verifica durante il ciclo d'onda, mentre il trasporto dei sedimenti sospesi è dato dall'integrazione della velocità istantanea con le concentrazioni lungo i profili verticali.

STP descrive inoltre nel dettaglio le condizioni idrodinamiche, inclusi i processi di propagazione, *shoaling* e frangimento delle onde, il calcolo delle forzanti derivanti dai gradienti di *radiation stress*, il bilancio dei momenti per le direzioni trasversali e longitudinali che forniscono il set-up dell'onda e le velocità di corrente longitudinali.

Pertanto, l'applicazione del modulo LITDRIFT permette di definire il budget sedimentario in determinate zone di interesse, sulla base del clima meteomarino, ossia vento, marea e *storm surge*, e condizioni batimetriche lungo un profilo. In particolare, il trasporto viene calcolato lungo profili scelti come rappresentativi di tratti costieri che possono essere considerati uniformi e rettilinei. Tali profili devono coprire l'intera *surf-zone*, ossia la fascia costiera dove avvengono i frangimenti delle onde, in quanto rappresenta la zona dove si verifica la maggiore movimentazione di sedimenti.

7.1 Impostazione del modello LITDRIFT

Nell'ambito del presente studio, il modulo LITDRIFT è stato applicato al fine di:

- stimare il trasporto litoraneo in termini di direzioni del trasporto prevalente;
- individuare la profondità di chiusura del sistema, ossia la profondità oltre la quale il trasporto di sedimenti si può considerare trascurabile;
- individuare, se esistente, un *trend* di trasporto nei 42 anni di dati a disposizione.

A tale scopo sono stati identificati tre profili rappresentativi, trasversali a costa:

- profilo A: rappresentativo del tratto di litorale a ponente della foce del torrente Petronio;
- profilo B: rappresentativo del tratto di litorale compreso tra il cantiere navale di Fincantieri e la foce del torrente Petronio;
- profilo C: rappresentativo del tratto di litorale a levante del cantiere navale.

Tutti i profili coprono l'intera *surf-zone*, estendendosi fino alla profondità di circa 12 m.

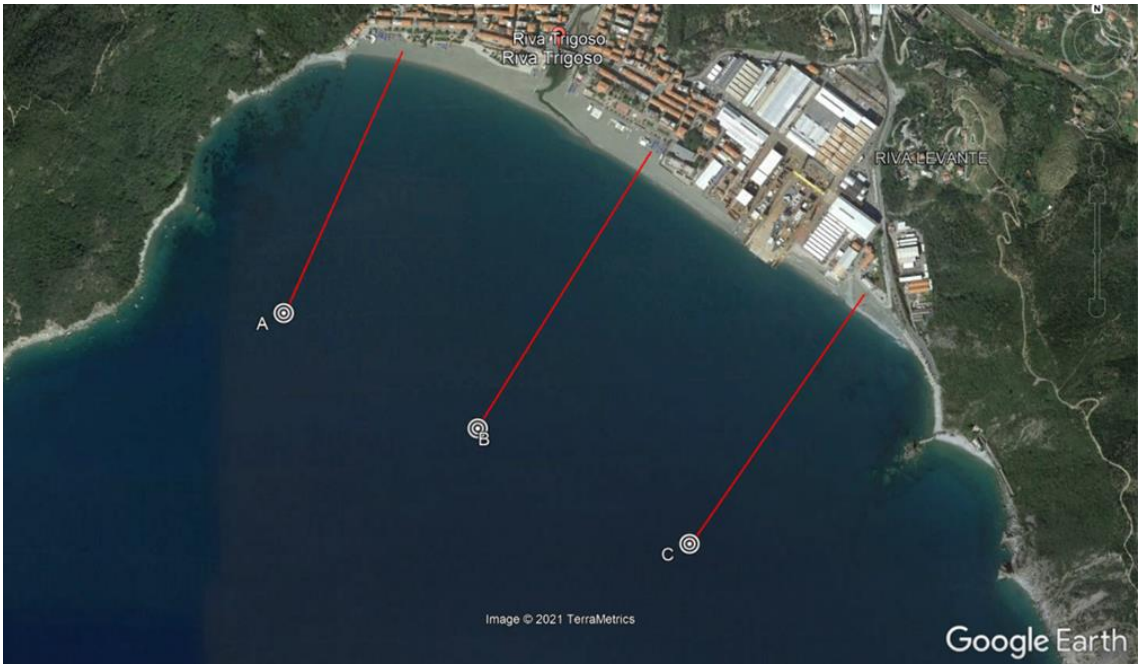


Figura 7-1 Ubicazione dei profili A, B e C nel litorale di Riva Trigoso, con indicate alle estremità offshore degli stessi, i punti omonimi ove sono state estratte le condizioni di onda per l'analisi del trasporto sedimentario

Le condizioni d'onda sono state estratte in corrispondenza delle estremità di largo dei profili dal modello di propagazione del moto ondoso largo-riva descritto nella sezione 4, per l'intera finestra temporale di 42 anni a disposizione (dal 19,79 al 2020).

Nelle figure a seguire (Figura 7-2, Figura 7-3 e Figura 7-4) sono state riportate le rose del clima per i tre punti A-B-C.

Dall'analisi del clima ondoso estratto alla profondità di 12 m, ovvero a circa 300 m dalla linea di riva, si osserva che il settore di provenienza delle onde si riduce sostanzialmente alle direzioni comprese tra 170°N e 240°N. Confrontando i tre diagrammi polari si evidenzia come per il punto A, ubicato più a ponente, ci sia una maggior protezione del promontorio di Punta Manara per gli eventi da Libeccio.

Le massime altezze d'onda e le frequenze di provenienza delle onde più alte si registrano per le direzioni comprese tra i 205°N e i 225°N, direzioni per le quali l'onda non subisce rotazione (limitata dissipazione per rifrazione).

Le caratteristiche del sedimento in termini di diametro medio d_{50} e di *grading* (definito come la radice quadrata del rapporto tra d_{84} e d_{16}) utilizzati nelle simulazioni modellistiche sono stati impostati sulla base dei dati illustrati alla sezione 3.4.

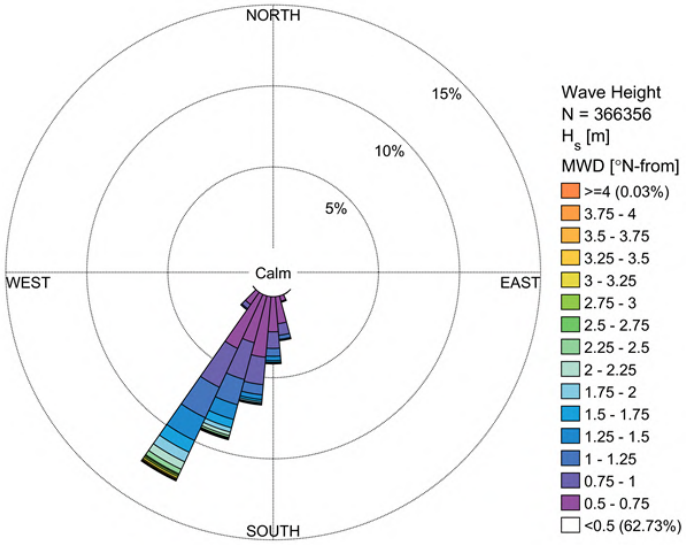


Figura 7-2 Rosa delle onde ottenuta sulla base della serie estratta nel punto posto al limite di largo del profilo A

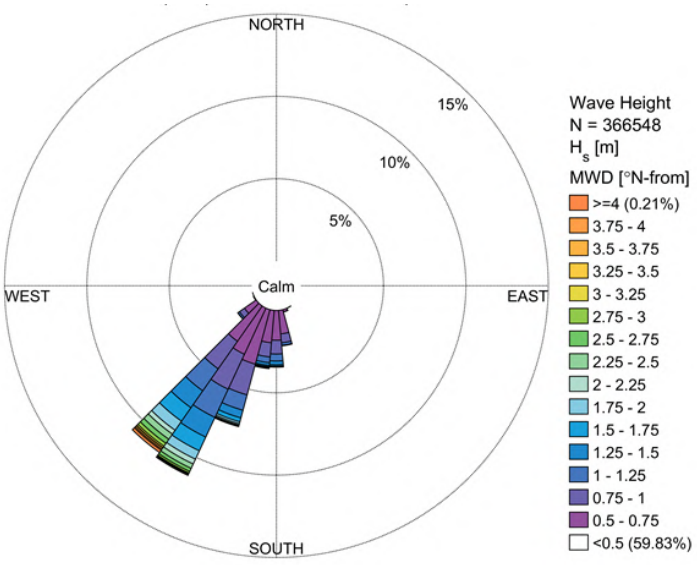


Figura 7-3 Rosa delle onde ottenuta sulla base della serie estratta nel punto posto al limite di largo del profilo B

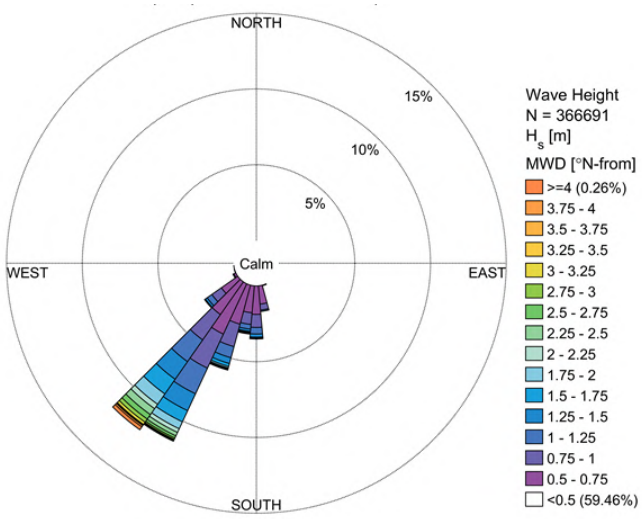


Figura 7-4 Rosa delle onde ottenuta sulla base della serie estratta nel punto posto al limite di largo del profilo C

7.2 Calcolo del trasporto di sedimenti

I risultati ottenuti dalla simulazione del periodo di 42 anni sono rappresentati in termini di andamento del trasporto *longshore* medio annuo (lordo, netto e nelle due direzioni) lungo i profili A (Figura 7-5), B (Figura 7-6) e C (Figura 7-7).

La maggior parte del trasporto sedimentario longitudinale (facendo riferimento al 95% del trasporto potenziale complessivo) avviene entro i primi 6.2 m di profondità per il profilo A, entro i 7.6 m di profondità per il profilo B e i 5.4 m per il profilo C. L'area centrale della baia è caratterizzata quindi da un'ampia fascia di spiaggia "attiva", ovvero soggetta a possibile movimentazione dei sedimenti, che si riduce gradualmente ai due estremi del litorale. La profondità di 7.6 metri, identificata per il transetto B, centrale rispetto all'intero litorale, può essere assunta come profondità di chiusura della spiaggia. Si precisa però che tale trasporto è da intendersi potenziale, ovvero il trasporto che si avrebbe in caso di effettiva disponibilità di materiale da movimentare.

Un'ulteriore considerazione sui risultati modellistici ottenuti è relativa alla localizzazione del picco del trasporto lungo il profilo trasversale, che si colloca per tutti i profili ad una profondità compresa tra 1 e 2 m, a conferma che la maggior parte della movimentazione del materiale avviene in una ristretta fascia in prossimità della battigia.

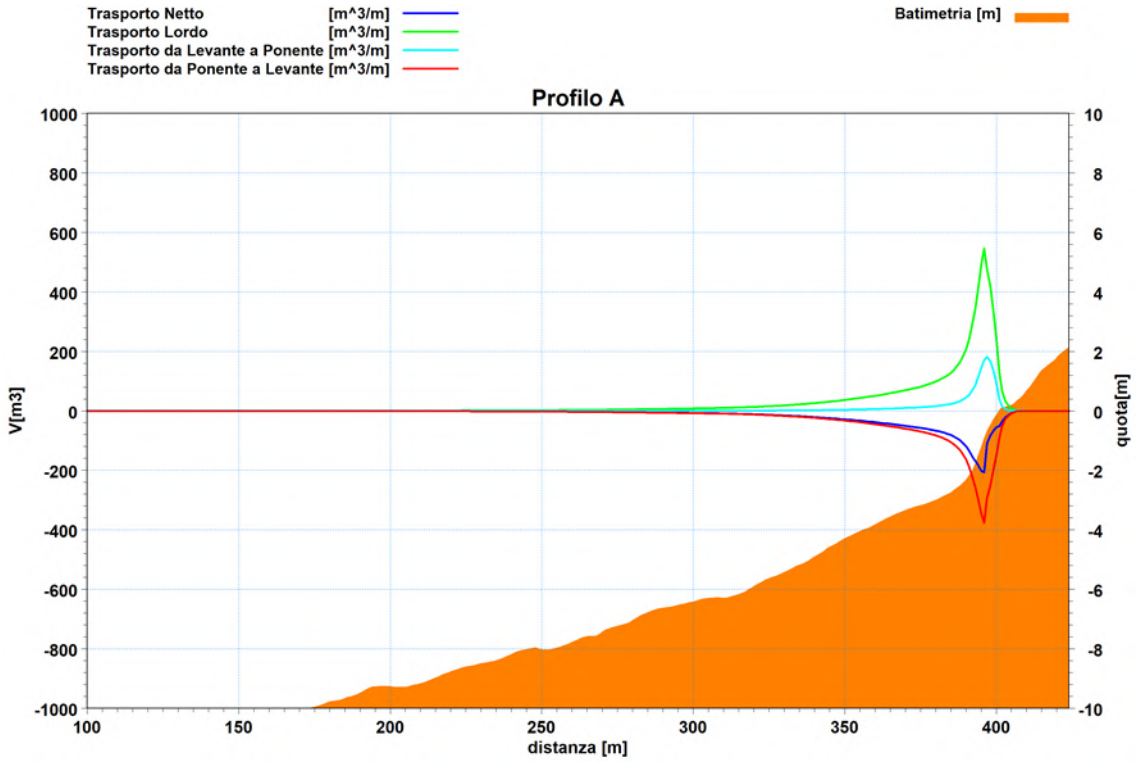


Figura 7-5 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo A

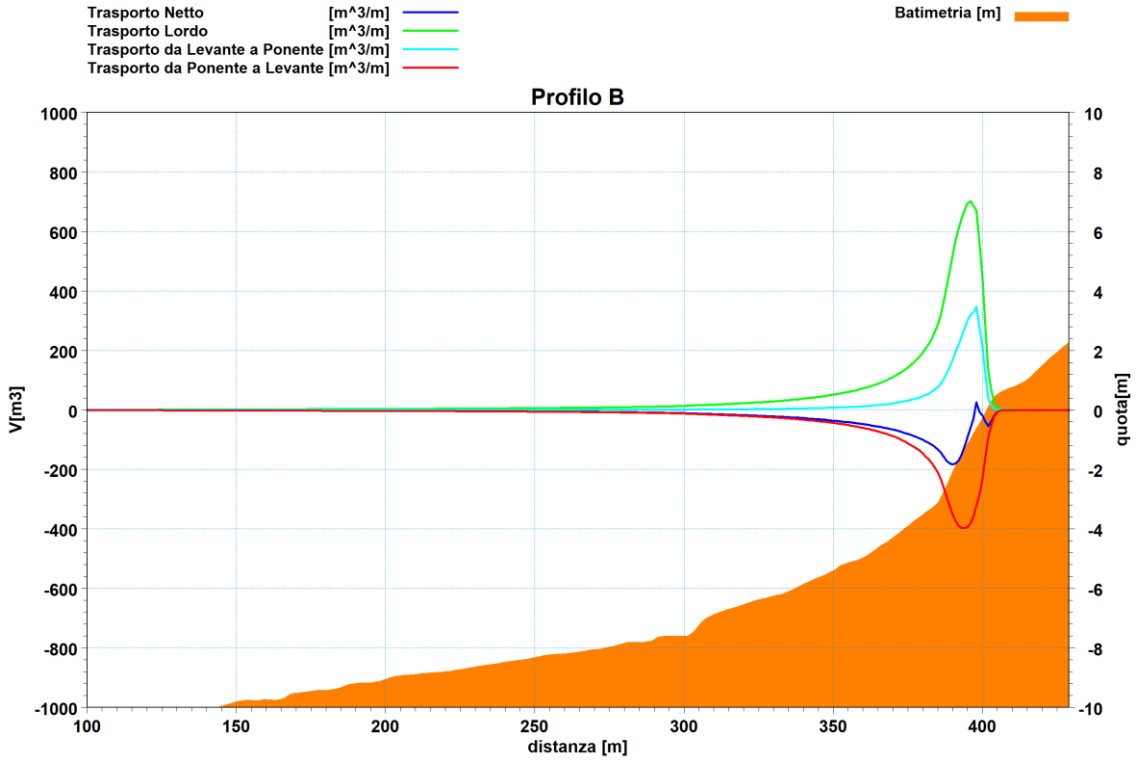


Figura 7-6 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo B

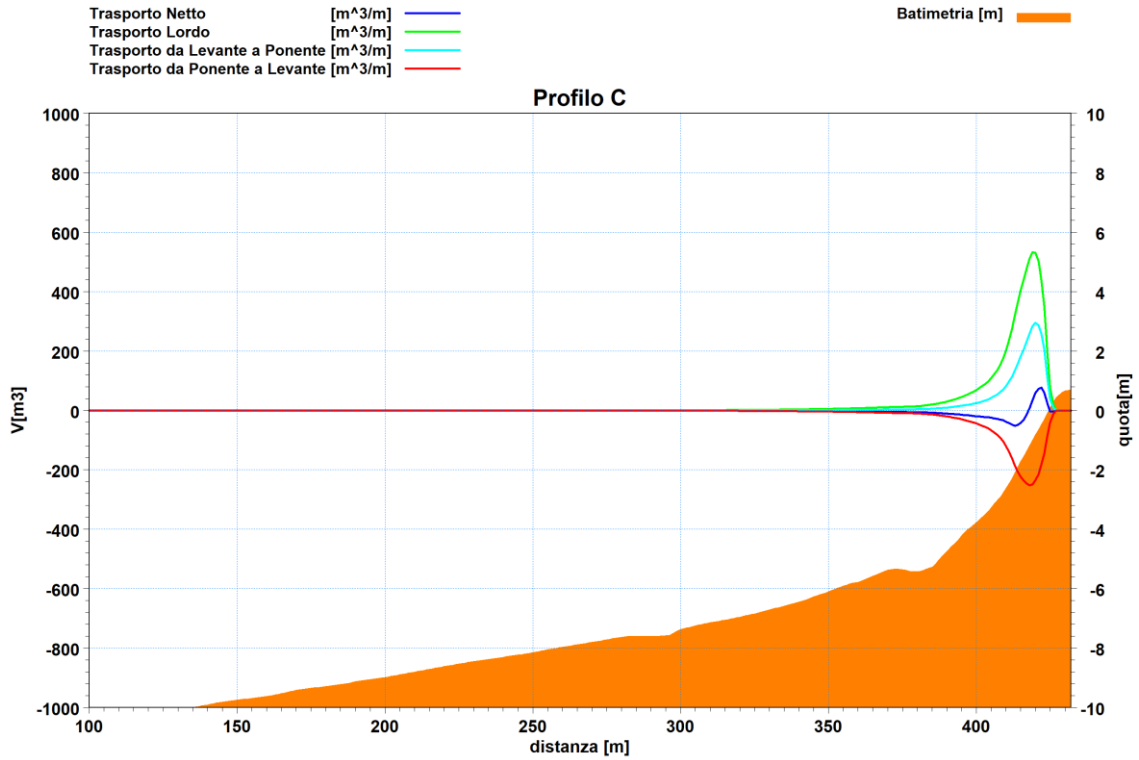


Figura 7-7 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo C

A completamento dell'analisi sul trasporto sedimentario longshore si riportano, con riferimento al profilo centrale B, gli andamenti rispettivamente del trasporto potenziale lordo (in Figura 7-8) e netto (in Figura 7-9) negli anni di dati a disposizione (1979-2020). Tali grafici devono essere valutati solo per l'identificazione di un eventuale trend evolutivo nel tempo, sia quantitativo che di direzione prevalente, e non per stimare i valori di trasporto sedimentario reale, nella realtà inferiori rispetto a quelli evidenziati nel grafico, che fa riferimento al trasporto potenziale.

Nella serie di valori relativi al trasporto sedimentario potenziale lordo si osserva una discreta variabilità annuale dal 1979 fino al 2009 (da 7'000 a 27'000 m^3) quando, per 7 anni consecutivi, i volumi di trasporto lordo si riducono ad un range compreso tra i 10'000 e 15'000 m^3. Successivamente al 2016 si evidenzia un incremento del trasporto lordo fino a valori prossimi a 20'000 m^3 annui.

L'andamento dei valori di trasporto netto evidenzia invece una significativa variazione inter-annuale nei volumi e nella direzione del trasporto litoraneo prevalente, indicativi di una variabilità non trascurabile delle quantità di materiale movimentate annualmente da ponente verso levante e viceversa. Il segno, positivo o negativo, attribuito al trasporto sedimentario netto è infatti indice della direzione prevalente del materiale lungo il litorale, per l'anno in esame; è interessante notare che dopo un trentennio circa nel quale il trasporto netto risulta caratterizzato da una direzione prevalente da ponente verso levante, negli ultimi anni si osserva un'alternanza nel verso del trasporto risultante. Tale indicazione è diretta conseguenza di un lieve incremento, sia in termini di intensità che di frequenza, di eventi da Sud / Sud-Est (Mezzogiorno e Scirocco).

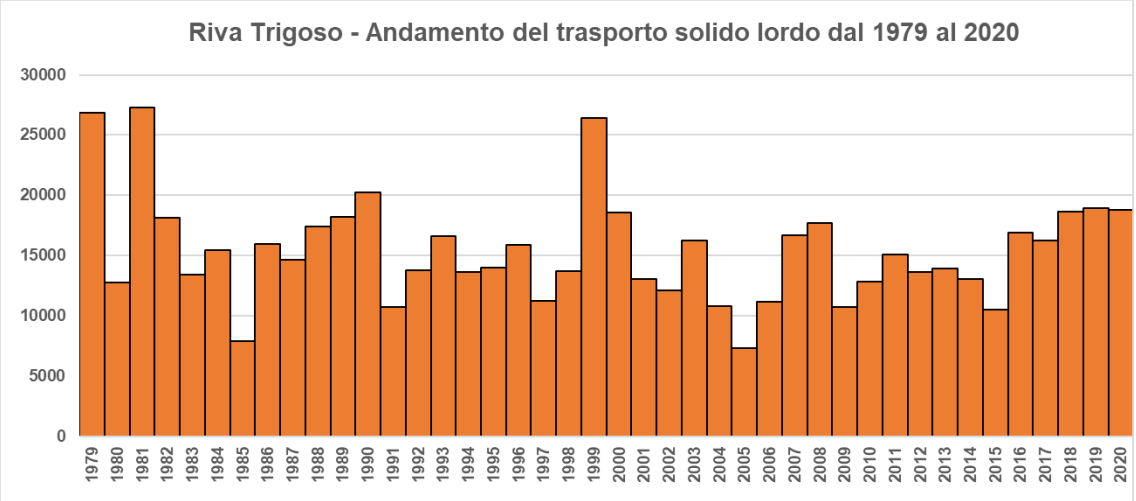


Figura 7-8 Trasporto sedimentario lordo potenziale annuale per il periodo 1979-2020 – profilo B

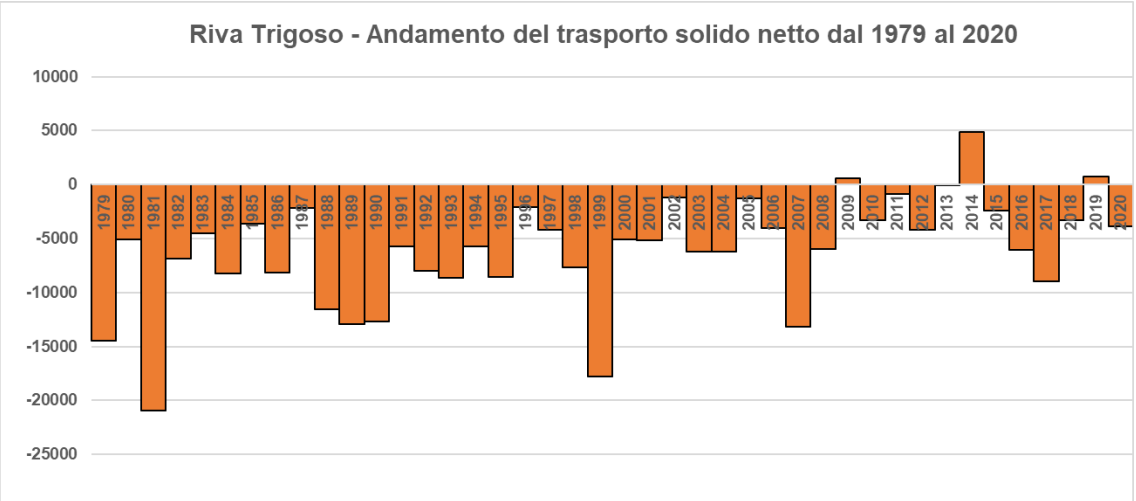


Figura 7-9 Trasporto sedimentario netto potenziale annuale per il periodo 1979-2020 – profilo B

8 Analisi dell'evoluzione della linea di riva

Al fine di quantificare l'eventuale impatto sulle dinamiche costiere della nuova configurazione del cantiere navale prevista dal progetto, si è proceduto simulando l'evoluzione della linea di riva della spiaggia di Riva Trigoso utilizzando il codice di calcolo LITLINE [5] del pacchetto LITPACK.

LITLINE simula gli effetti sulla costa dei gradienti del trasporto solido litoraneo e calcola l'evoluzione della linea di riva risolvendo l'equazione di continuità dei sedimenti con la tecnica delle differenze finite.

Il modello si basa sulla teoria ad una linea, in cui si assume che il profilo trasversale trasli rigidamente in avanti (accrescimento) e indietro (erosione) sulla base del bilancio sedimentario lungo costa. Pertanto, con questo modello, la morfologia della spiaggia è descritta dalla posizione della linea di riva e dai profili rappresentativi selezionati lungo costa.

LITLINE permette inoltre di introdurre nel calcolo sia l'effetto di strutture (come, ad esempio, pennelli, rivestimenti in massi e scogliere distaccate) sia l'effetto di eventuali apporti puntuali o distribuiti di sedimento.

I dati in input dal modello sono:

- posizione della linea di riva;
- quote topo-batimetriche in profili trasversali rappresentativi (spiaggia emersa e sommersa);
- clima ondoso in testata ad ogni profilo: altezza, periodo e direzione dell'onda;
- livelli marini ed eventuali correnti di marea;
- posizione e dimensioni di eventuali strutture.

Il modello fornisce come risultato la posizione della linea di riva nel corso degli anni ed i tassi di trasporto solido *longshore*.

Una descrizione di maggior dettaglio del codice di calcolo è riportata in Allegato D.

8.1 Implementazione e calibrazione del modello LITLINE

L'analisi delle immagini storiche a disposizione del litorale di Riva Trigoso conferma quanto evidenziato nell'ambito del Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero di Ambito Costiero 15, dedicato proprio alle Unità Fisiografiche del Golfo del Tigullio, della Baia del Silenzio e di Riva Trigoso [6], ovvero la sostanziale stabilità del litorale di Riva Trigoso.

Tale assetto è condizionato da una serie di fattori, dalla forma della baia, ben confinata dai due promontori aggettanti di punta Manara e punta Baffe, all'ampiezza trasversale della spiaggia, che permette una completa dissipazione del moto ondoso durante le mareggiate senza indurre fenomeni di riflessione su strutture, all'alimentazione sedimentaria garantita dal torrente Petronio, la cui foce è ubicata all'interno del piccolo golfo e che compensa in buona misura le inevitabili perdite di sedimento verso il largo.

Al fine di calibrare il modello di previsione dell'evoluzione della linea di riva si è proceduto preventivamente a riprodurre le tendenze evolutive di un periodo per il quale l'andamento della costa risulti noto. Dal geoportale della Regione Liguria https://geoportal.regione.liguria.it/ [7] sono state reperite le informazioni sulla linea di riva ottenute dalla restituzione vettoriale sulla base dei fotogrammi di voli dedicati effettuati nel 1944, nel 1973, 1983, 1993 e 2003. Il periodo 1993 - 2003 è stato utilizzato per ottenere la taratura dei principali parametri del modello.

Successivamente, il modello calibrato è stato applicato al layout di stato attuale e progettuale (in questo caso in riferimento anche al completamento delle fasi realizzative 1+2 oltre che a quella finale (fasi realizzative 1+2+3)).

8.2 Calibrazione del modello di evoluzione della linea di riva

La calibrazione dei parametri utilizzati nel modello è stata eseguita al fine di ottenere, mediante l'applicazione del modello LITLINE, la linea di riva del 2003 a partire dalla linea di riva del 1993 (Figura 8-1).

Il modello LITLINE è stato pertanto applicato per simulare l'evoluzione della linea di riva nel decennio selezionato, con le caratteristiche ondametriche estratte in differenti punti sottocosta, alla profondità di 9 m, dal lungo run di propagazione del clima ondoso (rif. Capitolo 4).

I parametri di calibrazione del modello sono stati impostati in modo da ottenere una tendenza evolutiva, in termini di avanzamento ed arretramento della linea di riva, in accordo con l'andamento delle linee di riva storiche a disposizione (Figura 8-1).

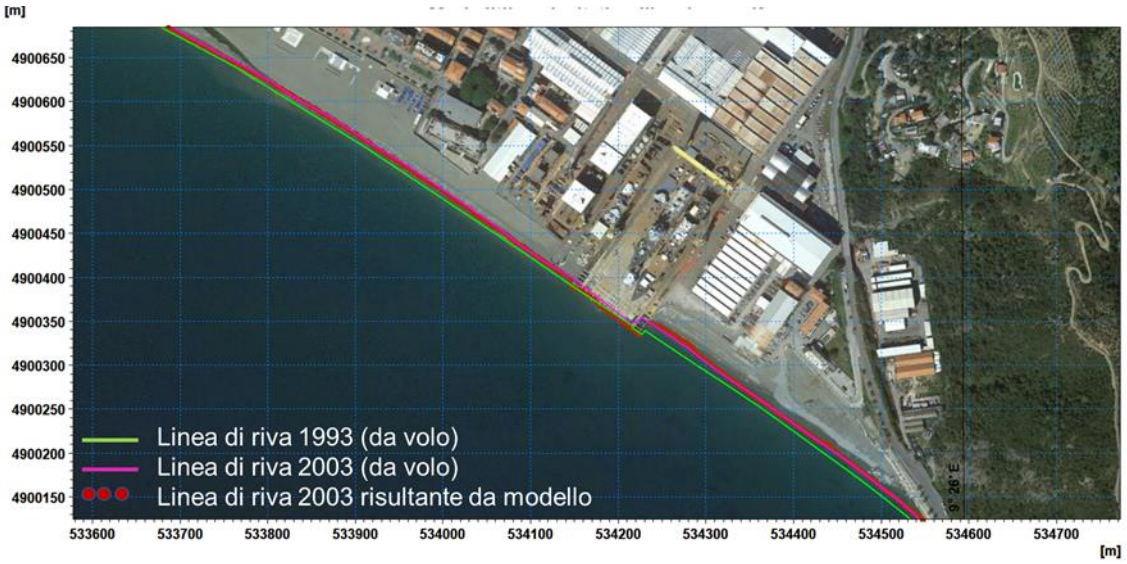


Figura 8-1 Linee di riva prese a riferimento per la calibrazione del modello LITLINE (iniziale anno 1993 in colore verde e finale anno 2003 in colore rosa) e il risultato dell'evoluzione della spiaggia da modello (puntini di colore rosso)

Quanto emerge dall'analisi della tendenza evolutiva, ben riprodotta dal modello, è un lieve arretramento della linea di riva, un poco più marcato a levante del cantiere navale (circa 10 m), meno evidente a ponente (circa 5 m). La zona del cantiere non evidenzia particolari variazioni.

8.3 Evoluzione della linea di riva nella configurazione di stato attuale

I parametri utilizzati nella fase di calibrazione del modello sono stati successivamente applicati alla configurazione di stato attuale per la stima dell'evoluzione a 10 anni.

Per il clima ondoso si è anche qui fatto riferimento alle caratteristiche di onda estratte dal lungo run di propagazione del clima ondoso (rif. Capitolo 4), ma per l'evoluzione futura si è fatto riferimento al decennio più recente di condizioni di onda a disposizione (2010 al 2020). Tale assunzione è stata adottata per tenere conto dei trend più recenti (incremento della frequenza degli eventi di Scirocco rispetto alla media 1979-2020).

La linea di riva alla fine dei 10 anni riprodotti evidenzia un lieve arretramento di 3-5 m nella porzione di spiaggia a ponente dell'area del cantiere navale di Fincantieri e di circa 8-10 m nella porzione di litorale più a levante.

Tali oscillazioni sono paragonabili alla variazione indotta da una singola mareggiata intensa.

Si specifica che la zona di pertinenza del cantiere navale è stata inserita nel modello come "inerodibile", in considerazione della tipologia di imbasamento delle opere esistenti.



Figura 8-2 Previsione dell'evoluzione della linea di riva in 10 anni per l'arenile di Riva Trigoso ottenuta con il modello LITLINE nella configurazione di stato attuale; in azzurro è rappresentata la linea di riva iniziale e in blu quella risultante dopo 10 anni

8.4 Evoluzione della linea di riva nelle configurazioni di progetto

L'analisi dell'evoluzione della riva è stata predisposta sia per la configurazione progettuale relativa alla realizzazione delle sole fasi 1+2 (Figura 6-10), sia per quella completa(1+2+3).

I risultati del modello mettono in evidenza che le opere in progetto non modificano, se non localmente, l'attuale evoluzione della linea di riva del litorale di Riva Trigoso. Il limitato aggetto delle opere verso mare, e la tipologia di strutture in progetto (del tutto analoghe a quelle già presenti), non comportano infatti evidenti effetti sul trasporto litoraneo naturale.

Entrambe le configurazioni di progetto evidenziano un lieve arretramento di 4-6 m massimi nella porzione di spiaggia a ponente dell'area del cantiere navale di Fincantieri e di circa 10-12 m nella porzione di litorale più a levante. In entrambi i casi i valori di arretramento risultano leggermente superiori rispetto a quelli attuali (rispettivamente di 1 m a ponente e di 2 m a levante).

Anche per queste simulazioni modellistiche la zona del cantiere è stata impostata come "inerodibile".

Si precisa che tali valutazioni fanno riferimento alla sola fenomenologia naturale, senza la messa in conto di eventuali interventi di ripascimento degli arenili o di operazioni di movimentazione del fondale antistante il cantiere per esigenze operative dello stesso.



Figura 8-3 Previsione dell'evoluzione della linea di riva in 10 anni per il di Riva Trigoso ottenuta con il modello LITLINE nella configurazione progettuale delle fasi realizzative 1+2; in azzurro è rappresentata la linea di riva iniziale e in blu quella risultante dopo 10 anni



Figura 8-4 Previsione dell'evoluzione della linea di riva in 10 anni per il di Riva Trigoso ottenuta con il modello LITLINE nella configurazione di progetto completa di ampliamento del cantiere navale; in azzurro è rappresentata la linea di riva iniziale e in blu quella risultante dopo 10 anni

9 Sintesi dello studio e conclusioni

Lo studio ha riguardato una serie di attività di modellazione numerica a supporto dell'iter autorizzativo della realizzazione di un nuovo pontile funzionale a una nuova linea di varo nello Stabilimento Fincantieri di Riva Trigoso.

Mediante l'utilizzo del database di ricostruzione delle condizioni di vento e onda nel Mar Mediterraneo (MWM - Mediterranean Wind Wave Model) è stato possibile:

- caratterizzare il clima ondoso al largo;
- propagare l'intera serie ultra-quarantennale di moto ondoso da largo verso riva;
- predisporre l'analisi degli eventi estremi direzionale al limite del paraggio di Riva Trigoso;
- selezionare una serie di eventi d'onda, variabili per altezza e direzione di provenienza ben rappresentativi del clima ondoso locale.

Le onde rappresentative sono state simulate in dettaglio con un sistema modellistico integrato bidimensionale onda-corrente, con l'utilizzo del codice di calcolo MIKE 21 SW-HD, che ha permesso di ricostruire l'andamento del moto ondoso e della circolazione nella zona di interesse sia nello stato attuale che nella configurazione progettuale comprensiva delle strutture a pontile, che verranno realizzate con tecnologia analoga a quelle esistenti. I nuovi pontili, progettati per consentire l'accesso dal mare con chiatte, con ponte allineato con il piano dello scalo, ed il successivo trasferimento delle navi in fase di varo, tramite utilizzo di carrelli, presentano un aggetto limitato verso il mare, tanto che le modellazioni numeriche hanno evidenziato esclusivamente limitate e locali variazioni nella circolazione e nella propagazione dell'onda. In tutti i casi la corrente litoranea aggira agevolmente l'ostacolo e non si evidenzia l'insorgenza di correnti dirette verso il largo indotte dal cantiere.

L'analisi del trasporto litoraneo ha evidenziato un'ampia fascia di spiaggia sommersa attiva, fino a 7.6 m nella zona più centrale del paraggio, ed una direzione del trasporto litoraneo prevalente da ponente verso levante. I risultati del modello hanno inoltre evidenziato che, dopo un trentennio circa nel quale il trasporto netto è risultato caratterizzato da una direzione prevalente costantemente da ponente verso levante, negli ultimi anni si è riscontrata un'alternanza nel verso del trasporto risultante annuale. Tale variazione è diretta conseguenza di un lieve incremento, sia in termini di intensità che di frequenza, di eventi da Sud / Sud-Est (Mezzogiorno e Scirocco) rispetto a quelli da Sud Ovest (Libeccio).

L'analisi storica delle tendenze evolutive ha permesso di evidenziare la sostanziale stabilità del litorale di Riva Trigoso, anche se si riscontra un lieve arretramento dell'ordine dei 10 m (in 10 anni) nella porzione di spiaggia a levante del cantiere e pari a circa 5 m (sempre in 10 anni) nella porzione di ponente del cantiere.

La modellazione dell'evoluzione della linea di riva infine ha evidenziato un impatto localizzato dell'intervento con arretramenti della spiaggia in 10 anni sostanzialmente identici tra la configurazione di stato attuale e quelle di progetto considerate (fasi realizzative 1+2 e configurazione finale del cantiere). Le differenze rispetto alla configurazione attuale in termini di maggiore arretramento risultano infatti pari a circa 1 m a ponente e 2 m a levante.

10 Riferimenti

[1] Contento G., Donatini L., Lupieri G., Pedroncini A. and Cusati L. *MWM: A 35 years wind & wave high resolution hindcast dataset and an operational forecast service for the Mediterranean Sea*. Proceedings of 18th International Conference on Ships and Shipping Research NAV'2015, pp. 116-125, ISBN 978-88-940557-1-9

[2] CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - www.jeppesen.com/marine/commercial/professional

[3] MIKE by DHI 2021. *MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark

[4] MIKE by DHI 2021. *MIKE 21 Hydrodynamic Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark

[5] MIKE by DHI 2021. *LITPACK.* DHI, Hørsholm, Denmark

[6] Regione Liguria, Piano di Ambito dell'Ambiente Marino e Costiero – Ambito Costiero 15, Unità fisiografiche Golfo del Tigullio, Baia del Silenzio e Riva Trigoso (Settembre 2011)

[7] https://geoportal.regione.liguria.it/ , Evoluzione della linea di riva dal 1944 al 2016

ALLEGATI

ALLEGATO A

Mediterranean Wind Wave Model

Descrizione tecnica

General description of the models' chain

The models and datasets used for the development of the MWM database are:

- the *CFSR* (*Climate Forecast System Reanalysis*) global re-analysis dataset, produced and freely published by NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) (Saha et al, 2010; http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description), hourly (re-forecast) data with a space resolution of 0.5°; these data are used as initial (IC) and boundary conditions (BC) of the *WRF-ARW model* (below);

- the atmospheric model *WRF-ARW – version 3.4.1* (*Weather Research and Forecast - Advanced Research WRF*), model developed by NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) (Skamarock and Klemp, 2007; Michalakes et al, 2001; Michalakes et al, 2005); *WRF-ARW* is presently considered among the best state-of-the-art non-hydrostatic meteorological models; it is supported by a massive worldwide community that contributes to its local use and development (http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm; http://www.wrf-model.org/index.php);

- the wave model MIKE 21 Spectral Waves (SW) developed by DHI (former Danish Hydraulic Institute) (Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004). MIKE 21 SW is among the state of the art wave models, widely used in thousands of offshore and coastal applications worldwide.

In the following a description of the CFSR dataset, the WRF-ARW and the MIKE 21 SW model is given, with specific interest to the implementation adopted in MWM.

CFSR Dataset

The CFSR dataset (Fig. A.1) is the result of a long and complex process performed by NCEP, an ensemble of nine weather prediction centers in the United States belonging to the NWS (*National Weather Service*) of the NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). The simulation, completed in 2011, is based on a global atmospheric numerical model including atmosphere-ocean and sea-ice couplings, with a systematic ingestion of both conventional (point) and satellite observations with data assimilation procedures.

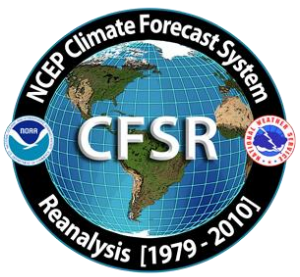


Figure A.1

The CFSR now covers a 35-year period from 1979 to 2013 (included) and is continuously updated with new recent data. The simulations were performed as 9 hours forecast simulations, initialized 4 times a day (at 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00) between the 6-hourly re-analysis frames. The

results of these simulations, gathered in the CFSR dataset, consist in complete atmospheric data over ocean and lands with a one hour time resolution and a 0.5° horizontal resolution, while the vertical resolution changes greatly amongst the atmospheric variables, spanning from the single surface value up to values at 64 different isobaric levels.

MWM dataset ingest the 6-hourly CFSR data, specifically the *ds093.0* dataset.

Chawla et al (2013) presented a thorough analysis of the *CFSR* dataset against satellite and oceanic buoys data. The final goal of that study is the use of the U_{10} wind data from the *CFSR* dataset as the forcing term of *WWIII* to generate wave fields at global scale, without any assimilation of wave data. The analysis of the *CFSR* dataset shown in that paper includes the intrinsic performance of the model in terms of the seasonal and annual variability of the percentiles. A moving average is applied to smooth the altimeter data from the satellites and from the buoys. The normalized percentiles ("...normalized with the wind speeds at corresponding percentiles from the altimeters") computed over the satellite tracks exhibit an oscillatory behavior, never below 0.93 or 0.90 in the Northern and Southern hemisphere respectively. From that analysis, the wind and wave *CFSR* and *WWIII* data compare very well with satellite data in terms of normalized percentiles. The Q-Q plots at selected offshore buoys are generally good or very good, with some unexpected variations from case to case for some buoys close to the coast, with even a contradictory behavior between U_{10} and H_s in some locations.

The analysis of the wind field of the *CFSR* dataset is far beyond the scope of the present work but still some checks have been done in specific cases, like the event of November 1999 in Trieste (Italy). The performance of a local area model is directly related to the information contained in the global model used as boundary and initial conditions; Fig. A.2 after Contento et al (2014) shows the wind speed for the case of November 1999 in Trieste (Northern Adriatic Sea - Italy); the red dots are experimental data by NOAA (http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis); the yellow line corresponds to the re-analysis data *CFSR d093.0* (Saha et al, 2010; http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description) interpolated at the same position of the station; the blue dots are related to a fully certified and verified measurement station of the Regional Agency for the Environment Protection (ARPA FVG-OSMER, http://www.osmer.fvg.it/home.php) located few meters far from the station used by NOAA (http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis); the cyan line corresponds to the present hindcast dataset (model *WRF-ARW*). It is rather evident that the CFSR dataset ingests the experimental data from NOAA but there are some non-negligible discrepancies between the two experimental datasets (private communication with ARPA FVG-OSMER - Regional Agency for the Environment Protection – Friuli Venezia Giulia Region, Italy). In this case the local model *WRF-ARW* is able to develop the local wind field and matches correctly the measurement by ARPA, irrespective of the wrong assimilated data as BC and IC; this, however, cannot be always guaranteed.

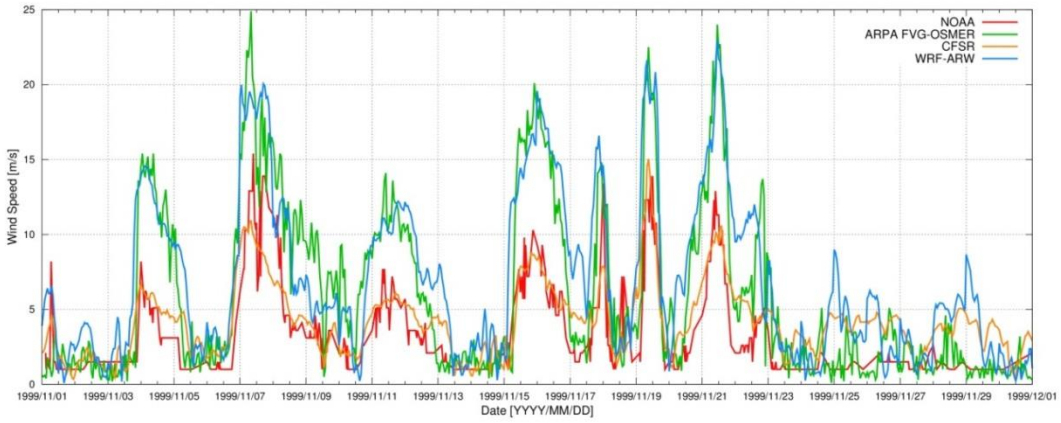


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis) (red line) and from ARPA-FVG OSMER (http://www.osmer.fvg.it/home.php) (blue line). Model data from *CFSR* (Saha et al, 2010) (yellow line) and the present simulations with *WRF-ARW* (cyan line) are overlapped.

The scope of these checks was solely to verify the sensitivity of the *CFSR* wind pattern to a complex steep geographic area facing the sea. The eastern coast of the Adriatic Sea is just an example among many others. The availability of certified wind data from the local Regional Agency for the Environment Protection – Friuli Venezia Giulia (ARPA FVG-OSMER, http://www.osmer.fvg.it/home.php) related to ground stations and to a fixed station in the middle of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea *http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84*]), helped a lot in defining the set-up of the local area meteorological model. The aim of the set-up process was to let the model *WRF-ARW* develop mesoscale and local weather structures, thus using a domain large enough to develop these structures, but at the same time avoiding the use of too large a domain that may lead to a model drift from the experimental data. These undesired effects were observed along the entire Adriatic Sea, specifically on the eastern side (Contento et al, 2011; Contento et al, 2014).

WRF-ARW meteorological model

The WRF model is an open source mesoscale to microscale atmospheric model developed by the American atmospheric research center NCAR in cooperation with many other meteorological institutions. It is largely used worldwide for both atmospheric research and forecast or hindcast purposes due to its ability to perform atmospheric simulations over a wide range of length scales spanning from less then 1 kilometer to thousands of kilometers. This flexibility is further increased by its capability of performing two way coupled nested runs.

The WRF modelling system includes a pre-processor system (WPS), a data assimilation system (WRF-DA) and the dynamic solver. During this work the ARW dynamic solver, developed and maintained by the Mesoscale and Microscale Meteorology Division of NCAR, has been used. The ARW dynamic core is a fully compressible and non-hydrostatic model, based on a terrain-following hydrostatic pressure vertical coordinate system and on an Arakawa C-grid staggered evaluation of the vector quantities. The solver uses high order time integration and 3-D advection schemes.

The WRF model works internally with NetCDF files, a self-describing and machine-independent data format particularly suitable for the manipulation of long arrays of scientific data.

A WRF-ARW model run is a quite complex process, since it involves several different steps to be run in a precise order. First of all, WRF requires boundary and initial conditions; these conditions can be supplied by the GRIB files obtained from the CFSR dataset files described in CISL RDA: NCEP Climate Forecast System Re-analysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010." [Online] Available at http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description

GRIB files needed to cover completely the whole simulated period must be fed to the model to complete the simulation process successfully.

Moreover, since the atmosphere behaviour is strongly dependent on the soil characteristics, detailed data about these characteristics must be fed to the model too in order to let it develop the local weather phenomena correctly. However, there is no need to produce this type of data since suitable 30" resolved geographic data are included in the default WRF pre-processing (WPS). Since these data are time-independent they need to be downloaded only once, and they remain valid for every simulation unlike the GRIB files. Actually, some of the parameters contained in the geographic data cannot be considered as completely time-independent; in fact, some of the parameters show a time dependence which, however, is limited to seasonal changes, e.g. the

reduced vegetation cover in winter. The possible seasonal variability of the geographical parameters is included in the geographical data archive of WPS.

A complete WRF-ARW simulation needs the WPS (*WRF Pre-processor System*) to be run before the numerical solver (*wrf.exe*). The WPS pre-processor system deals with both the domain set-up and the preliminary input manipulations; it is composed by three main executables carrying out different tasks:

- *geogrid.exe* is responsible for the definition of the horizontal grid as well as for the interpolation of the geographic data on the user-defined grid. When performing nested runs, the *geogrid.exe* run produces a NetCDF file *geo_em.dxx.nc* containing the grid and geographic data for each domain, where xx stands for the code of the domain (01, 02, …).

- *ungrib.exe* is responsible for the decoding of the input GRIB files used as initial and boundary conditions. The GRIB files, which need to be linked to the work directory of WPS by means of the script *link_grib.csh*, are "ungribbed" and rewritten in an intermediate format suitable for further manipulations, excluding all the fields not needed for the following model run.

- *metgrid.exe* is responsible for the horizontal interpolation of the intermediate input files produced by ungrib.exe on the grid defined by geogrid.exe. Moreover, the geographic data contained in the *geo_em* files are ingested by metgrid and written on its output files. The output of metgrid.exe is in fact composed by the NetCDF files *met_em.dxx.YYYY-MM-DD_HH:00:00.nc*, each containing the interpolated boundary conditions and geographic data for the xx domain and for every timestep of the supplied GRIB files. In the case considered, as the CFSR dataset is composed of hourly data, the produced *met_em* files are hourly spaced too.

The whole WPS process is controlled by a single external configuration file: *namelist.wps*, which contains the user specified parameters defining the time length and the domain of the simulation as well as the time and space resolutions.

An additional manipulation is needed before launching the actual solver: the NetCDF data produced by metgrid.exe must be vertically interpolated onto the user- defined vertical levels of the WRF simulation. This task is performed by the *real.exe* executable, which, despite actually being a pre-processing routine, is not included in the WPS system. The real.exe run finally produces the NetCDF files needed by the bare solver: *wrfinput_dxx* and *wrfbdy_dxx*, containing respectively, for each of the nested domains under simulation, the initial condition inclusive of the domain geographic data and the boundary conditions forcing the domain over time.

The last step of a WRF-ARW model simulation is the *wrf.exe* solver run which performs the numerical integration and produces the final output files *wrfout_dxx_YYYY-MM-DD_HH:MN:SS,* one for each simulated domain and for every temporal frame in the total simulated period. Each wrfout file contains therefore the complete atmospheric variables set calculated by the ARW solver for every point of the user defined simulation 3-D grid at a single temporal frame.

Both real.exe and wrf.exe are controlled by *namelist.input*, an external configuration file gathering the user defined parameters regarding the vertical resolution of the simulation, the atmosphere microphysical parameters and, again, the time / length scales and resolutions of the simulation.

A script that makes all steps involved automatic in a WRF-ARW simulation procedure, from the set-up of the configuration files to the archiving of output files, was developed and tested extensively.

The above depicted working scheme is summarized in Figure A.3:

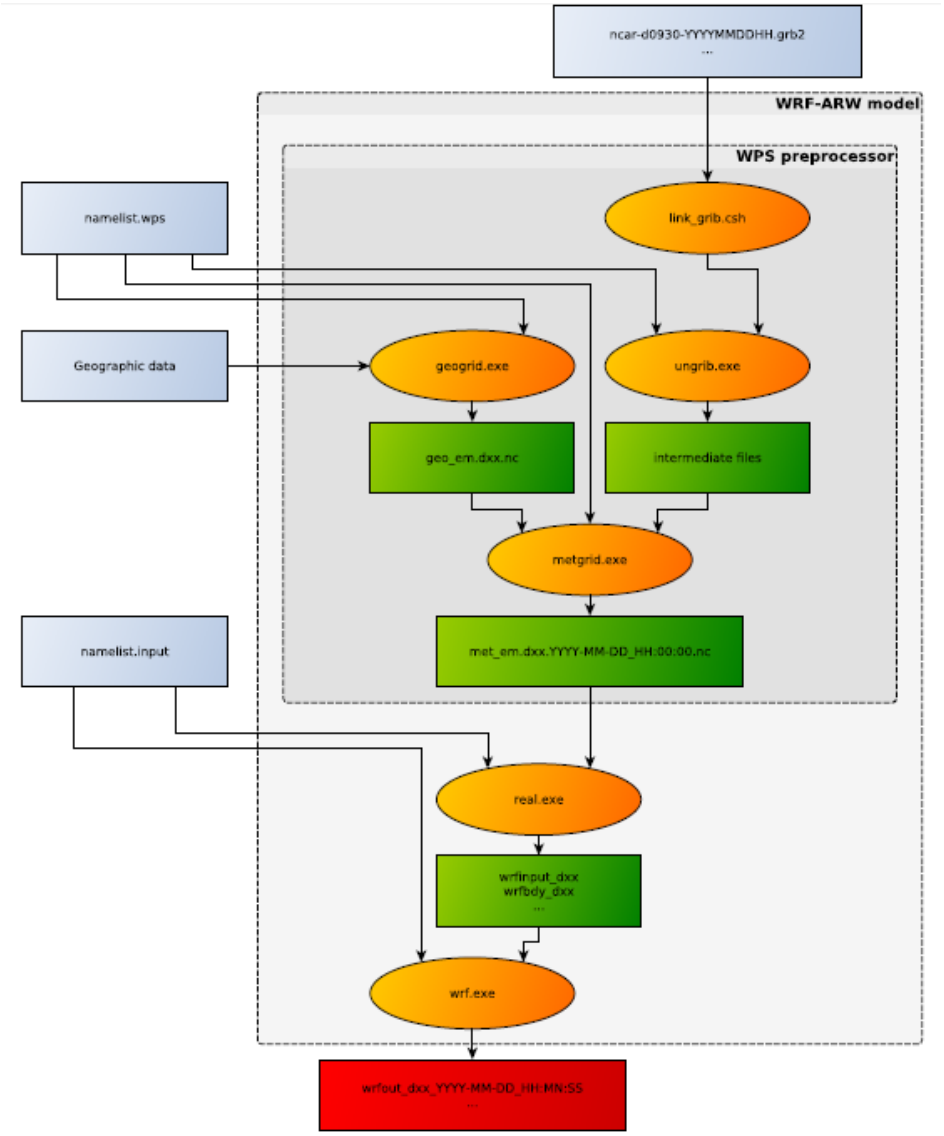


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

WRF-ARW domains, resolution, set-up in MWM

The preliminary set-up and tuning of the met-ocean models chain was performed simulating the month of November 1999, chosen for the remarkable number of very intense storms occurred over the Mediterranean Sea. The second step, before running the entire period 1979-2013, was done simulating one complete year, from November 1999 to October 2000, relying on 41 ground stations along the Mediterranean coast and 25 wave buoys for comparison. The results obtained in these steps are summarized in Contento et al. (2014), Contento et al. (2012-2014) and Donatini (2013).

The two-steps set-up started with the meteorological model *WRF-ARW*, adopting different configurations (domain size, resolution, run length, spin-up time) and comparing the wind speed and direction with observational data from ground stations. Since the *CFSR* (Saha et al, 2010) re-analysis dataset reproduces large scale events correctly, after several tests the final decision was to adopt three relatively small, overlapping domains, which cover respectively the Western, Eastern and Central Mediterranean Sea (Fig. A.4). Hereafter these domains will be referred as MEW, MEE and MEC respectively. The wind field obtained from the 3 domains was merged in a

single dataset by a bi-linear interpolation on a Lat-Lon grid and by a linear blending of the results inside the two overlapping zones (Fig. A.4).

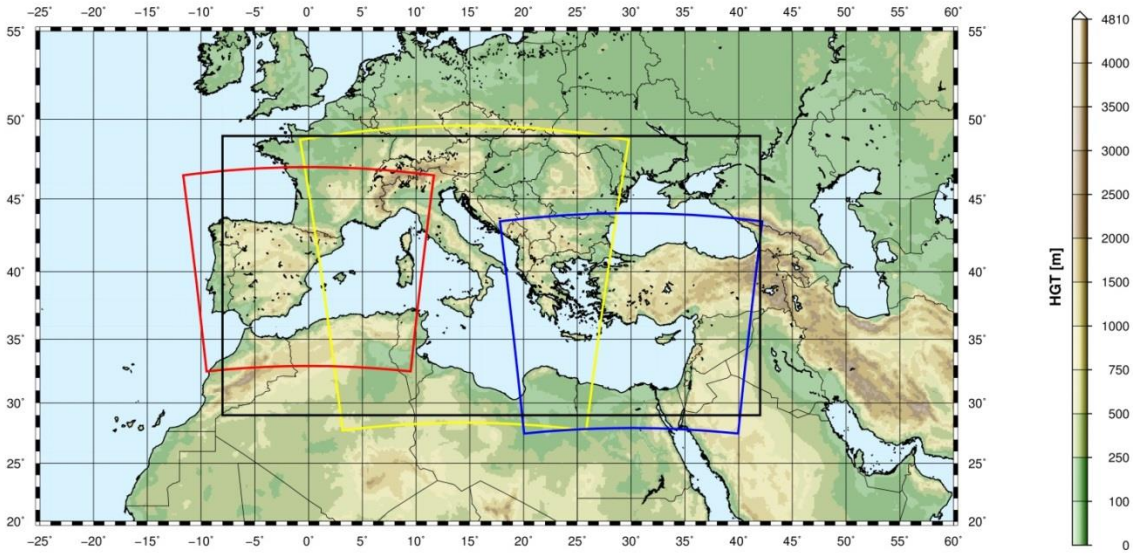


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

The horizontal resolution of *WRF-ARW* was set to 10.53 km, with a grid ratio to the *CFSR* re-analysis data of 1:5 approximately. An additional domain (ITN) with a resolution of 3.51 km was run over Northern Italy as a nested domain of MEC.

The time length of the model run, in terms of hours simulated continuously between two consecutive model initializations with *CFSR* frames,proved to be among the most important parameters that influence the quality of the results. Keeping a small run length reduces the risk of model drift. On the other hand, shortening it excessively may lead to a too constrained behavior of the model, which prevents the correct development of the mesoscale weather structures. The problem of the model drift proved to be particularly tough over the Adriatic Sea where the orography is rather complex and the North-Eastern wind (Bora) can occasionally reach the speed of 150 km/h or more in very narrow zones.

A spin-up time window was used in order to let the model *WRF-ARW* ingest and process the coarser initial conditions from *CFSR*, thus letting it evolve and develop local weather structures. This spin-up window was overlapped with the tail of the previous run so that the data of the simulation during the spin-up window were discarded. The time length of this overlapping window is typically of few hours.

The Mediterranean Sea is a very complex basin from the meteorological point of view, with violent storms usually characterized by a short duration. The two examples given below show the importance of resolving the large space and time gradients of the variables.

Fig. A.5 shows a typical winter wind pattern (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The reference distance of these large variations is of 1° at most.

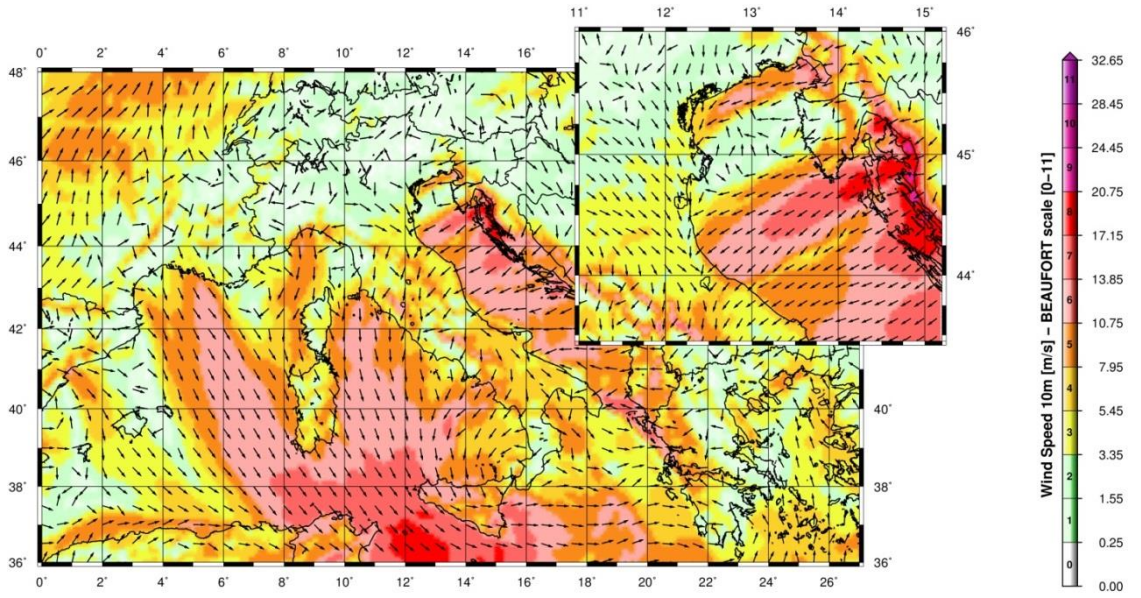


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the "Bora" wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure shows a zoom over the Northern part of the Adriatic Sea (Istria peninsula).

Fig. A.6 (Contento et al., 2011) shows the time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste that caused the loss of two human lives and damages in the main harbor. The squall lasted about 10 min reaching more than 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW* run at that time by some of the authors of this work for ARPA FVG-OSMER, http://www.osmer.fvg.it/home.php. The black line corresponds to the measurement at the station PALOMA (45° 37' 06" N, 13° 33' 55" E) [*http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84*]. The station is a fixed pole in the middle of the Gulf of Trieste. The measured wind speed is 5 min averaged with 5 min samples. The time step of the model is approximately 13 s. This situation is not uncommon in the Adriatic zone, mostly during the summer, with violent fronts from North and North-West then rotating to North-East.

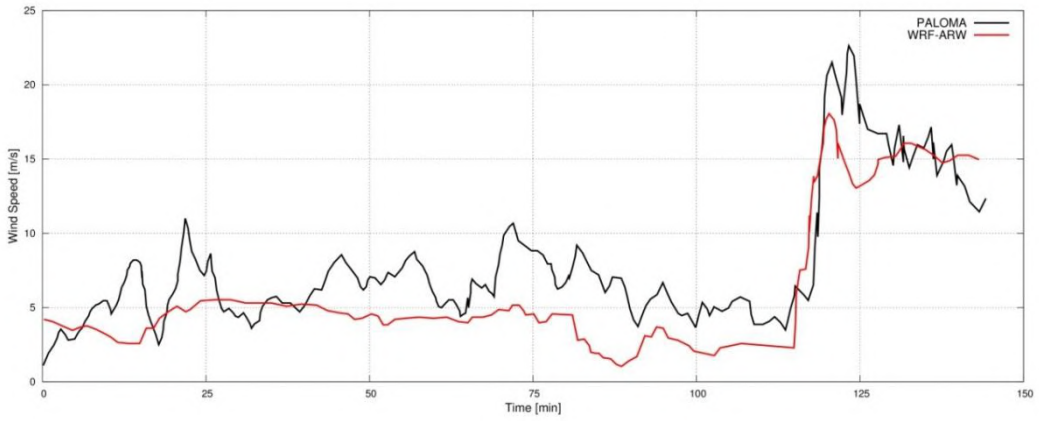


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black line corresponds to the measurement at the measurements station PALOMA (45° 37' 06" N, 13° 33' 55" E) [*http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84*]. The measured wind speed is 5 min averaged with 5 min samples. The time step of the model is approximately 13 s.

MIKE 21 SW wave model

The wave modeling system includes the state of the art third generation spectral wind-wave model MIKE 21 SW, developed by DHI. MIKE 21 SW simulates the growth, decay and transformation of wind-generated waves and swell in offshore and coastal areas.

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Directional decoupled parametric formulation
- Fully spectral formulation

and includes the following physical phenomena:

- Wave growth by action of wind
- Non-linear wave-wave interaction
- Dissipation due to white-capping
- Dissipation due to bottom friction
- Dissipation due to depth-induced wave breaking
- Refraction and shoaling due to depth variations
- Wave-current interaction
- Effect of time-varying water depth

The discretization of the governing equation in geographical and spectral space is performed using cell-centered finite volume method. In the geographical domain, an unstructured mesh technique is used. The time integration is performed using a fractional step approach where a multisequence explicit method is applied for the propagation of wave action.

For the production of the MWM database, the fully spectral formulation has been adopted, based on the wave action conservation equation, as described in e.g. Komen et al. and Young where the directional-frequency wave action spectrum is the dependent variable.

The time integration of the governing equations is done by using a dynamically determined time step. The time step is determined in order to verify the stability criteria (CFL number).

The only driving force is represented by the two components of wind fields U10 and V10, (x and y component of wind at the elevation of 10m). The process by which the wind transfers energy into the water body for generating waves is controlled by a uncoupled air-sea interaction.

The spectral discretization adopted in the wave model has been deeply investigated and the final configuration is able to guarantee at the same time a high level of accuracy of the results and a reasonable computational effort.

The model domain covers the whole Mediterranean Sea but the spatial resolution is not the same everywhere: while in the offshore areas the spatial resolution is around 0.1°, when approaching the coast the spatial resolution increases up to around 0.03°.

The wave model is forced by the wind fields coming from the WRF Atmospheric models, illustrated above. The wave model generated results in terms of wave parameters (Significant Wave Height, Wave Periods, Wave Directions, etc.) over the whole domain and, in addition, spectral parameters in predefined output locations have been stored, too.

MIKE 21 SW domain, resolution, set-up in MWM

The model domain, covering the entire Mediterranean Sea, is illustrated in Figure A.7.

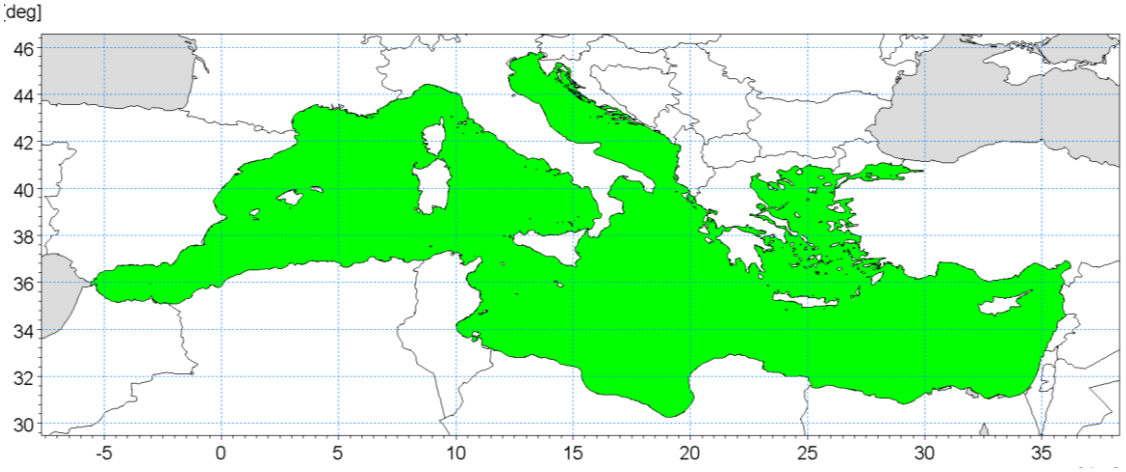


Figure A.7 Wave model domain filled in green

The unstructured mesh, generated over the entire domain by means of a specific tool included in MIKE 21 package, is characterized by different resolutions (in terms of mean length of triangle sides) over the domain. In particular the following criteria have been adopted:

- a coarser resolution of 0.1° (about 10 Km) is used for offshore areas;
- a finer resolution of 0.03° (about 3 Km) has been adopted in shallow water areas, where bathymetry is less than 100m depth or, in coastal areas characterized by very steep profiles, where the distance from the coastline is less than 5÷10 Km.

Figure A.8 illustrates the computational mesh of the Mediterranean wave model.

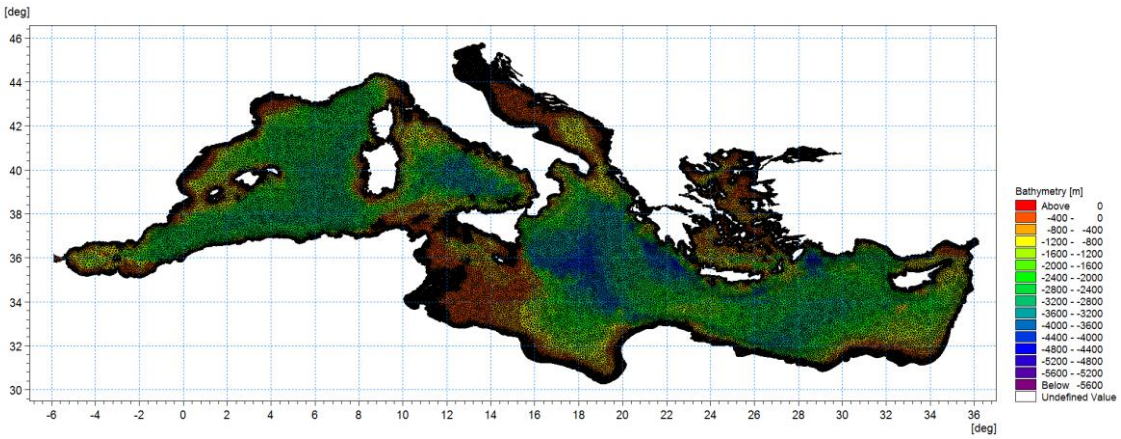


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

Figure A.9 illustrates a detail of the above computational mesh, with special focus on the Adriatic Sea.

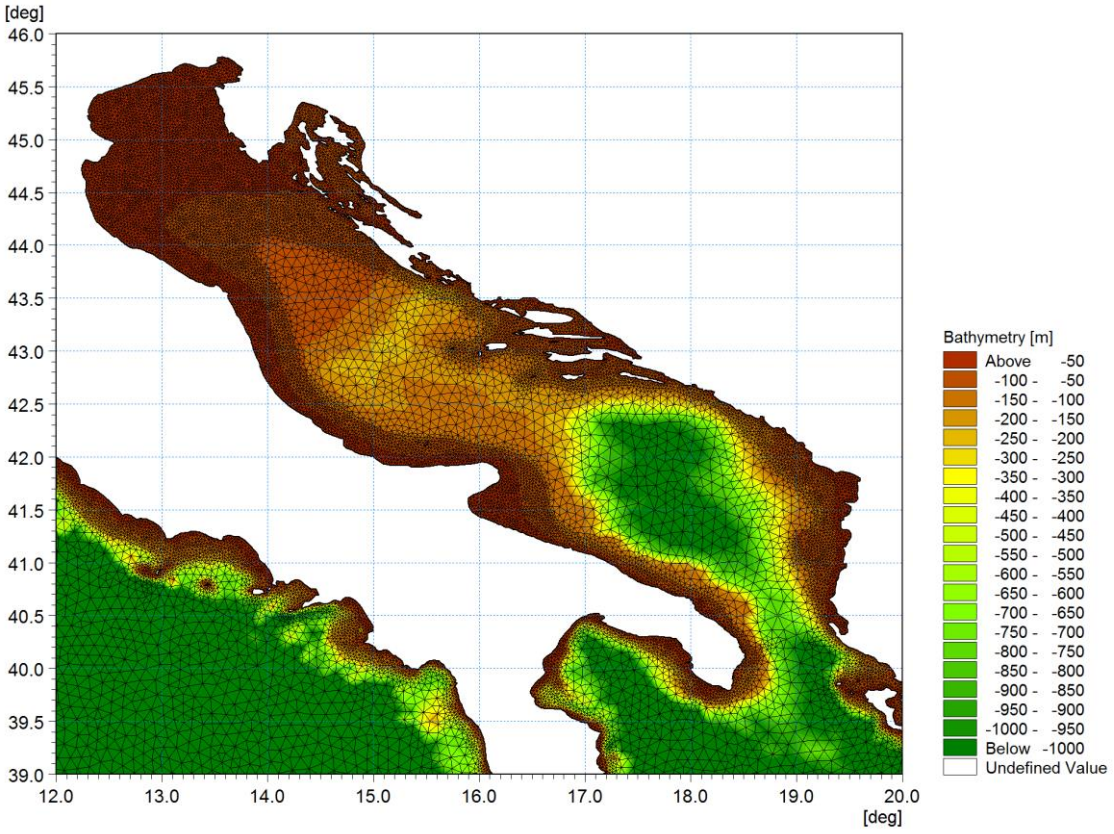


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

Scatter bathymetry data have been derived from GEBCO_08 database. The GEBCO_08 Grid is a 30 arc-second grid of global elevations and it is a continuous terrain model for ocean and land. The grid was generated by combining quality-controlled ship depth soundings with interpolation between sounding points guided by satellite-derived gravity data.

The gridded data are stored in a netCDF data file. Grids are stored as one dimensional arrays of 2-byte signed integer values. The complete data sets provide global coverage. Each data set consists of 21,600 rows x 43,200 columns, resulting in a total of 933,120,000 data points. The data start at the Northwest corner of the file, i.e. for the global file, position 89°59'45"N, 179°59'45"W, and are arranged in latitudinal bands of 360 degrees x 120 points/degree = 43,200 values. The data range eastward from 179°59'45"W to 179°59'45"E. Thus, the first band contains 43,200 values for 89°59'45"N, then followed by a band of 43,200 values at 89°59'15"N and so on at 30 arc-second latitude intervals down to 89°59'45"S. Data values are pixel centred registered, they refer to elevations at the centre of grid cells.

Figure A.10 illustrates GEBCO_08 scatter data for the entire area of the Mediterranean Sea.

GEBCO scatter data have not been used in the whole domain of the Mediterranean Sea. Following a detailed check of agreement and discrepancies between GEBCO database and nautical charts, it has been assumed to limit the use of GEBCO database for offshore areas (up to 500 m water depth) and to use nautical charts for shallower water areas (mainly coastal areas).

The nautical charts database which has been used is the CM93/3 database from CMAP.

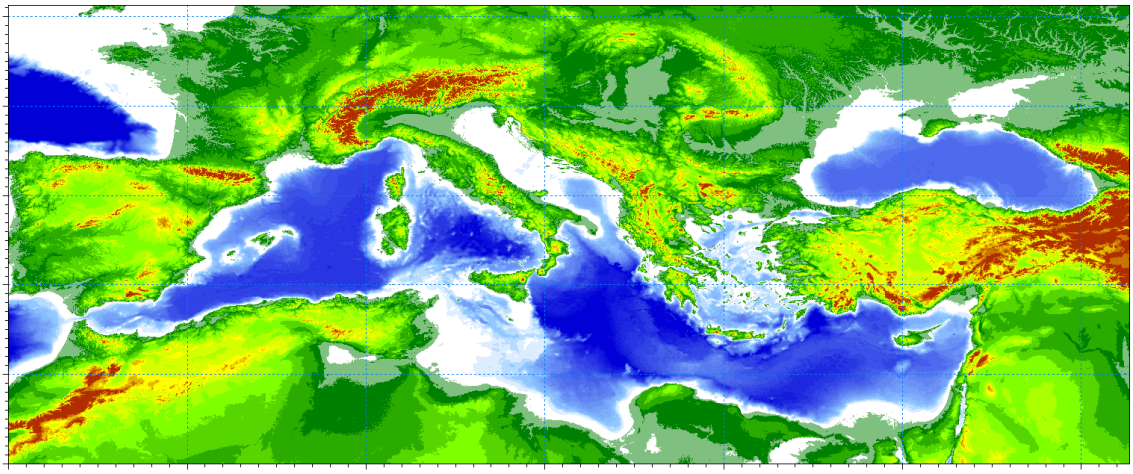


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

The number of discrete frequencies and directions form the so called “spectral resolution”, which is a key parameter for wave models in general. The number of discrete frequencies and directions should in fact be high enough to properly represent the “real shape” of the wave spectrum and, on the other hand, it can’t be too high, since it would lead to unacceptable computational times and memory consumption.

In terms of frequency range, the minimum frequency f_{min} (which corresponds to the maximum wave period T_{max}, according to the common relation $= \frac{1}{T}$) should be able to capture the longest wave periods that can occur in the Mediterranean Sea.

The analysis of ordinary and extreme waves in the Mediterranean Sea (from available data of wave buoys) has highlighted that almost all the wave energy associated to waves in the Mediterranean Sea are associated to wave periods between 1.5 seconds and 20 seconds.

In addition, a logarithmic distribution for the discrete frequencies acts better than a simple linear distribution, since most of the wave periods are concentrated below 8-10 seconds. A number of frequencies around 30 is widely considered as adequate for a proper discretization of wave energy spectra in the Mediterranean Sea. The following formulation has therefore been adopted:

$$f_{n=}0.04 \cdot \ 1.1^{n},$$

where n goes from 0 to 29 (30 frequencies in total). The discrete frequencies range from 0.04 Hz to 0.63 Hz (from 1.6s to 25.0s of Mean Wave Period T_m).

Also the choice of the number of discrete directions (directional discretization) is the result of detailed investigations and tests. In particular, a high number of wave model tests, each one characterized by a different spectral resolution (directional), i.e. by a different number of discrete directions have been setup and run.

Few examples of the results of the above model tests are illustrated from Figure A.11 to Figure A.13 in terms of short time series of wave heights extracted at 3 different locations where also measurements were available (La Spezia wave buoy, Ponza wave buoy, Cetraro wave buoy).

In all the below test cases, it appears that the two time series of wave height characterized by 24 and 36 discrete directions are almost coincident. Higher discrepancies can be found for a much limited number of discrete directions (12). After a high number of tests, the 24 directions solution has been assumed as a very good compromise between accuracy of results and computational time (the computational time of the wave model is linearly dependent on the number of discrete directions).

Provided that wave directions can vary within the 360° rose, the directional resolution of the wave model is 360°/24 = 15°

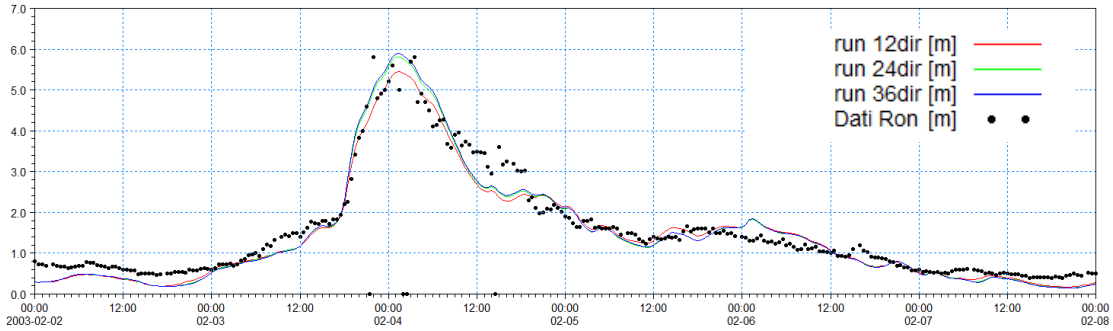


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

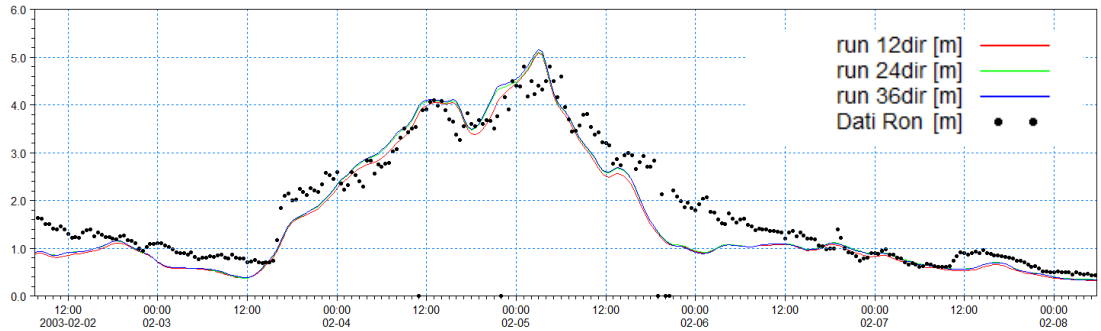


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

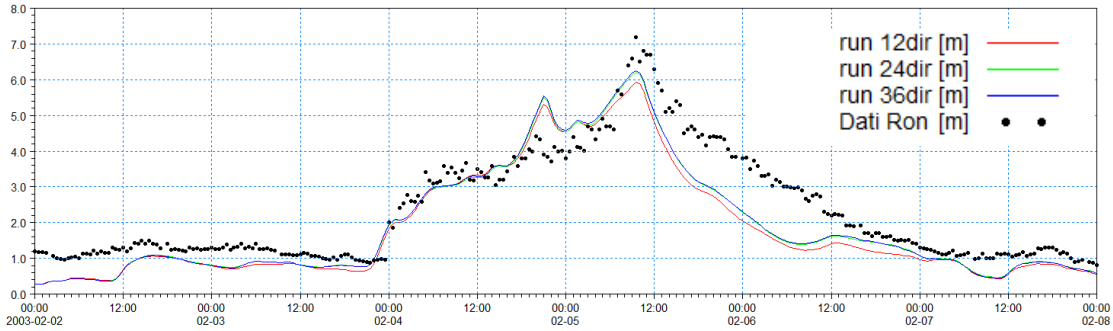


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

Available products of the MWM database

The results of the wind and wave model are stored, in the whole domain, in terms of wind parameters and wave parameters averaged over the wave period ("phase averaged results"). In particular, the following hourly time series are available:

- Wind speed, WS [m/s]
- Wind direction, WD [deg]
- Significant Wave height, Hs [m]
- Mean wave period, Tm [s]
- Peak wave period, Tp [s]
- Zero crossing period, Tz [s]
- Mean wave direction, MWD [deg]
- Peak wave direction, PWD [deg]
- Directional standard deviation, DSD [deg]

In addition, hourly spectral results (in terms of wave energy associated to the frequency-direction bins) are saved on a regular grid with an equidistant spatial resolution of 0.1°.

Figure A.14 and Figure A-15 illustrate respectively an example of phase averaged results over a portion of Mediterranean Sea (Hs) and an local example of spectral results.

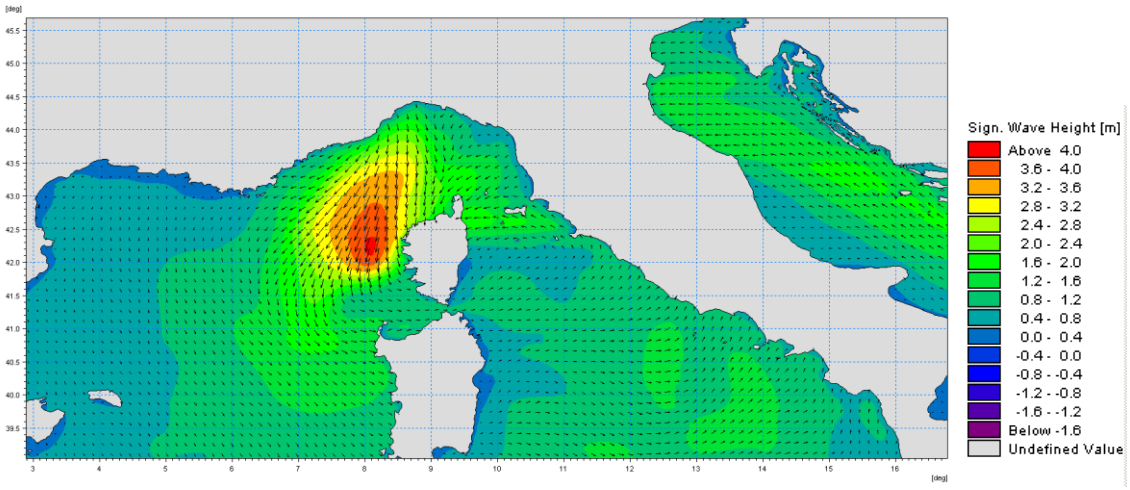


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

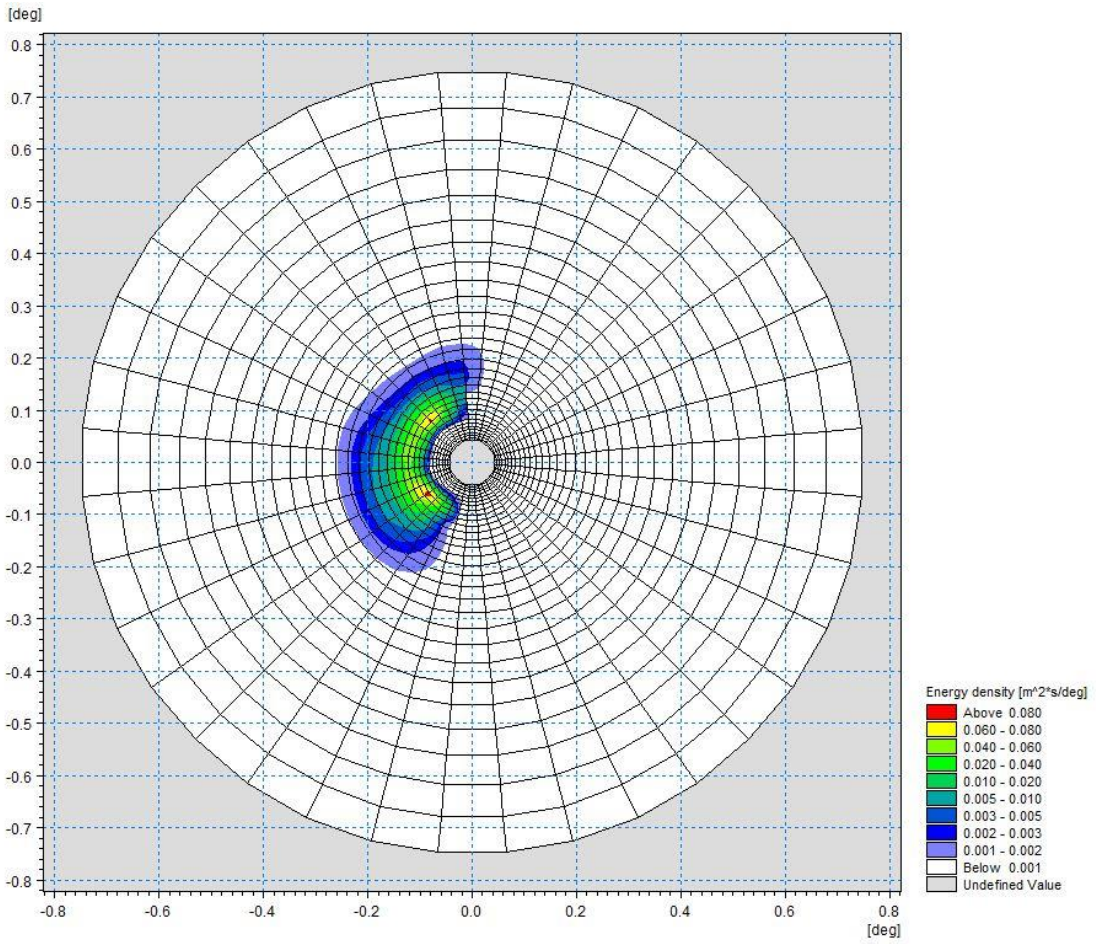


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

References

Ardhuin, F., Bertotti, L., Bidlot, J.R., Cavaleri, L., Filipetto, V., Lefevre, J.M,, Wittmann, P., 2007, Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea. *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 526-541.

Athanassoulis, G., Stefanakos, Ch., Cavaleri, L., Ramieri, E., NoEL, C., Lefevre, J.M., Gaillard, P., 2004, RTP 10.10 / WW_MEDATLAS Scientific Report.

Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M., 1978, Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proceedings, 16th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.569-587.

Bolaños-Sanchez, R., Sanchez-Arcilla, A., Cateura, J., 2007, Evaluation of two atmospheric models for wind-.wave modeling in the NW Mediterranean. *Journal of Marine Systems* 65:336-353.

Cavaleri, L., Bertotti, L., 2004, Accuracy of the modelled wind and wave fields in enclosed seas. Tellus, Vol. 56, pp. 167-175.

Cavaleri, L., 2005, The wind and wave atlas of the Mediterranean Sea – the calibration phase. *Advances in Geosciences*, Vol. 2, pp. 255-257.

Cavaleri, L., Sclavo., M., 2006, The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean Sea. Coastal Engineering, Vol.53, pp. 613-627.

Chawla, A., Spindler, D.M., Tolman, H.L., 2013, Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds, Ocean Modelling, Vol. 70, pp. 189-206.

Contento, G., Lupieri, G., Venturi, M. Ciuffardi, T., 2011, A medium-resolution wave hindcast study over the Central and Western Mediterranean Sea, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 16(2), pp. 181–201.

Contento, G., Lupieri, G., Donatini, L, Feudale, L, Pedroncini, A., Cusati, L.A., 2014, A state-of-the-art met-ocean model chain for wind&wave hindcast over the Mediterranean and Black Seas: implementation, tuning and validation against field data, accepted for presentation at the 21th Symposium Theory and Practice of Shipbuilding SORTA 2014, Oct. 2-4, 2014, Baška, Island of Krk, Croatia.

Contento, G., Lupieri, G., Donatini, L, 2012-2014, Project SEAPOL - Sistema modellistico ad Elevata risoluzione per l'Analisi storica e la Previsione del moto Ondoso nel mar Ligure, Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Technical Reports codes SEAPOL_UT_1.1.0 to SEAPOL_UT_5.1.0.

Donatini, L., 2013, Implementation of a state-of-art met-ocean model chain for hindcast wave simulations over the Mediterranean Sea and comparison of results with field data, Master Degree Thesis, Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Italy.

Donatini, L., Lupieri, G., Contento, G., 2014, A medium resolution wind&wave hindcast study for the Mediterranean Sea, Journal Paper, under review.

Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Krusemann, P., Meerburg, A., Mueller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., 1973, Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe, A(8), 12, 95 pp.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.H., Barnett, T.P., 1985. Computations and parametrizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: Parametrizations of the nonlinear energy transfer for applications in wave models. J. Phys. Oceanogr. Vol. 15, pp. 1378–1391.

ISPRA (formerly APAT), 2004, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, Dipartimento Tutela Acque Marine ed Interne, Servizio difesa delle coste, Analisi preliminare dei dati marini lungo le coste italiane – Atlante delle coste – Il moto ondoso al largo delle coste italiane, Technical Report (in Italian). http://www.apat.gov.it/site/_files/Atlante_coste/Introduzione.pdf.

Janssen, P.A.E.M., Abdalla, S., Hersbach, H., Bidlot, J.R., 2007: Error Estimation of Buoy, Satellite, and Model Wave Height Data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. **24**, pp. 1665–1677. doi: http://dx.doi.org/10.1175/JTECH2069.1

Michalakes, J., Chen, S., Dudhia, J., Hart, L., Klemp, J., Middlecoff, J., Skamarock, W., 2001, Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. *Developments in Teracomputing. In Proceedings of the 9th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology.* Eds. Walter Zwieflhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, 269-276.

Michalakes, J., Dudhia, J., Gill, D., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W., Wang, W., 2005, The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance. In *Proceedings of the 11th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology.* Eds. Walter Zwieflhofer and George Mozdzynski. World Scientific, 56 - 168.

Ponce del León, S., Guedes Soares, C., 2008, Sensitivity of wave model predictions to wind fields in the Western Mediterranean Sea. *Coastal Engineering*, Vol. 55, pp. 920-929.

Puertos del Estado, Spain, 2009, – (http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/), private communication.

Queffeulou, P., 2004, Long term validation of wave height measurements from altimeters. Marine Geodesy, Vol. 27, 495-510.

Queffeulou, P., Croizé-Fillon, D., 2010, Global altimeter SWH data set, version 7, Technical Report, Ifremer, ftp://ftp.ifremer.fr/cersat/products/swath/altimeters/waves/documentation/altimeter_wave_merge__7.0.pdf

Queffeulou, P., 2009, Altimeter Wave Height Measurements - Validation of Long Time Series.Poster: Ocean Surface Topography Science Team meeting, Seattle, Washington,USA.(http://www.aviso.oceanobs.com/en/courses/oststt/oststt-2009-seattle/posters/).

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Wollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y., Chuang, H., Juang, H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., VanDelst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., van den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C., Liu, Q., Chen,Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R., Rutledge, G., Goldberg, M., 2010, The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 91, 1015–1057.

Skamarock WC, Klemp JB, 2007, A time-split nonhydrostatic atmospheric model for research and NWP applications. *J. Comp. Phys.* Special issue on environmental modeling.

Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004: A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29th International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.

Tolman, H.L., 2002a. Alleviating the garden sprinkler effect in wind wave models. Ocean Modelling, Vol. 4, pp. 269–289.

Tolman, H.L., 2002f, Validation of WAVEWATCH III, version 1.15 for a global domain. Tech. Note 213, NOAA/NWS/NCEP/OMB, 33p.

Tolman, H.L., 2008, http://cioss.coas.oregonstate.edu/CIOSS/workshops/Altimeter_workshop_08/Coastal_Alt_Presentations/18_Tolman_Sig_Wave_Ht.pdf

Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004: A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29th International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.

Komen,G.J., Cavaleri,L., Doneland,M., Hasselmann,K., Hasselmann,S. and Janssen,P.A.E.M., (1984). Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, UK, 560 pp.

Young,I.R., (1999). Wind generated ocean waves, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier.

WAMDI-group: S. Hasselmann, K. Hasselman, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing, (1988) “The WAM model – a third generation ocean wave prediction model”, J. Phys. Oceanogr., 18, 1775-1810

General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) – www.gebco.net

CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - www.jeppesen.com/marine/commercial/professional/

Ole Baltazar Andersen (1995), Global ocean tides from ERS 1 and TOPEX/POSEIDON altimetry, J. of Geophys. Res., 100, C12, p. 25249-25260

Doodson, A. T., Warburg, H. D., 1941 “Admiralty manual of tides”

Web references

ARPA-FVG OSMER, [Online] http://www.osmer.fvg.it/home.php

ARW Online Tutorial.” [Online] Available at http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm

CISL RDA: NCEP Climate Forecast System Re-analysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010.” [Online] Available at http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description

NOAA, Hourly/Sub-Hourly Observational Data.” [Online] Available at http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis

The Weather Research&Forecasting Model Website.” [Online] Available at http://www.wrf-model.org/index.php

ALLEGATO B

MIKE 21 Spectral Waves (SW)

Descrizione tecnica



MIKE 21 Wave Modelling

MIKE 21 Spectral Waves FM

Short Description



DHI headquarters
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

+45 4516 9200 Telephone
+45 4516 9333 Support
+45 4516 9292 Telefax

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

MIKE21_SW_FM_Short_Description.docx / HKH/AJS / 2017-10-03

© DHI

MIKE 21 SW - SPECTRAL WAVE MODEL FM

MIKE 21 SW is a state-of-the-art third generation spectral wind-wave model developed by DHI. The model simulates the growth, decay and transformation of wind-generated waves and swells in offshore and coastal areas.

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Fully spectral formulation
- Directional decoupled parametric formulation

The fully spectral formulation is based on the wave action conservation equation, as described in e.g. Komen et al (1994) and Young (1999). The directional decoupled parametric formulation is based on a parameterisation of the wave action conservation equation. The parameterisation is made in the frequency domain by introducing the zeroth and first moment of the wave action spectrum. The basic conservation equations are formulated in either Cartesian co-ordinates for small-scale applications and polar spherical co-ordinates for large-scale applications.

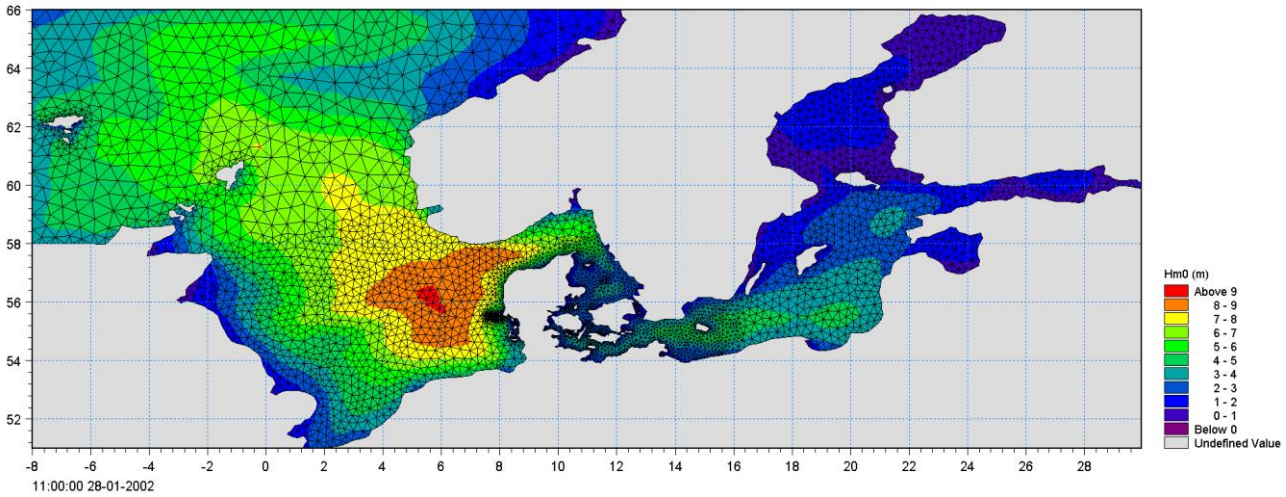
The fully spectral model includes the following physical phenomena:

- Wave growth by action of wind
- Non-linear wave-wave interaction
- Dissipation due to white-capping
- Dissipation due to bottom friction
- Dissipation due to depth-induced wave breaking
- Refraction and shoaling due to depth variations
- Wave-current interaction
- Effect of time-varying water depth
- Effect of ice coverage on the wave field

The discretisation of the governing equation in geographical and spectral space is performed using cell-centred finite volume method. In the geographical domain, an unstructured mesh technique is used. The time integration is performed using a fractional step approach where a multi-sequence explicit method is applied for the propagation of wave action.



MIKE 21 SW is a state-of-the-art numerical modelling tool for prediction and analysis of wave climates in offshore and coastal areas. © BIOFOTO/Klaus K. Bentzen



A MIKE 21 SW forecast application in the North Sea and Baltic Sea. The chart shows a wave field (from the NSBS model) illustrated by the significant wave height in top of the computational mesh. See also www.waterforecast.com

Computational Features

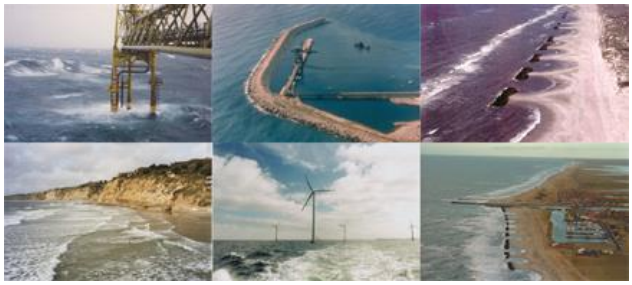
The main computational features of MIKE 21 SW - Spectral Wave Model FM are as follows:

- Fully spectral and directionally decoupled parametric formulations
- Source functions based on state-of-the-art 3rd generation formulations
- Instationary and quasi-stationary solutions
- Optimal degree of flexibility in describing bathymetry and ambient flow conditions using depth-adaptive and boundary-fitted unstructured mesh
- Coupling with hydrodynamic flow model for modelling of wave-current interaction and time-varying water depth
- Flooding and drying in connection with time-varying water depths
- Cell-centred finite volume technique
- Fractional step time-integration with an multi-sequence explicit method for the propagation
- Extensive range of model output parameters (wave, swell, air-sea interaction parameters, radiation stress tensor, spectra, etc.)

Application Areas

MIKE 21 SW is used for the assessment of wave climates in offshore and coastal areas - in hindcast and forecast mode.

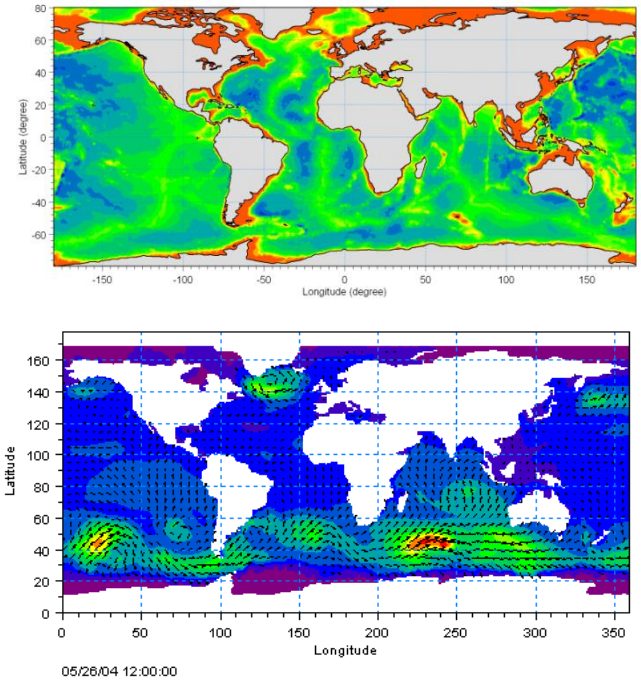
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



Illustrations of typical application areas of DHI's MIKE 21 SW – Spectral Wave Model FM

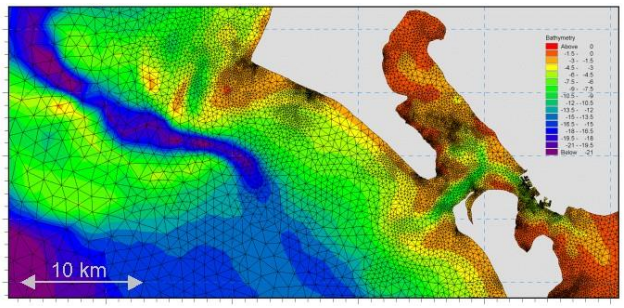
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

In this case, the measured data can then be supplemented with hindcast data through the simulation of wave conditions during historical storms using MIKE 21 SW.



Example of a global application of MIKE 21 SW. The upper panel shows the bathymetry. Results from such a model (cf. lower panel) can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models. See http://www.waterforecast.com for more details on regional and global modelling

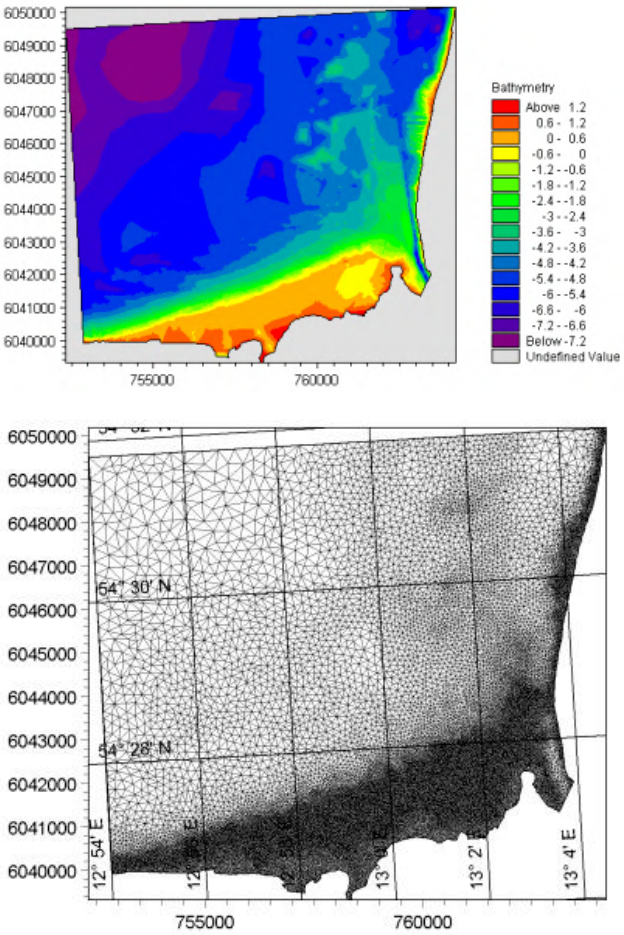
MIKE 21 SW is particularly applicable for simultaneous wave prediction and analysis on regional scale and local scale. Coarse spatial and temporal resolution is used for the regional part of the mesh and a high-resolution boundary and depth-adaptive mesh is describing the shallow water environment at the coastline.



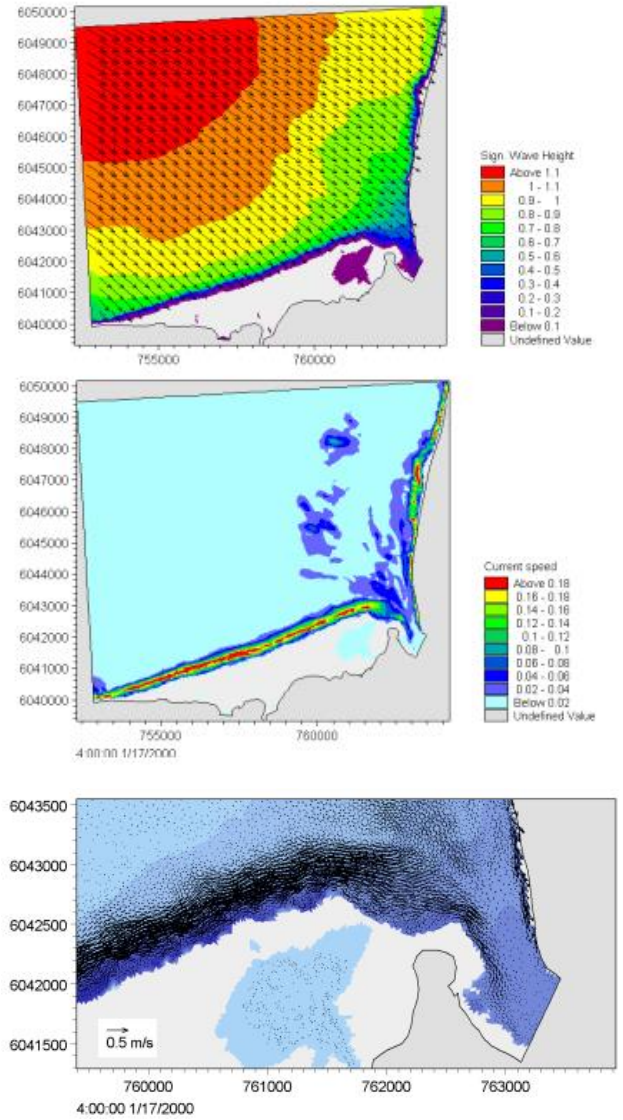
Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

MIKE 21 SW is also used for the calculation of the sediment transport, which for a large part is determined by wave conditions and associated wave-induced currents. The wave-induced current is generated by the gradients in radiation stresses that occur in the surf zone.

MIKE 21 SW can be used to calculate the wave conditions and associated radiation stresses. The long-shore currents and sediment transport are then calculated using the flow and sediment transport models available in the MIKE 21 package. For such type of applications, the directional decoupled parametric formulation of MIKE 21 SW is an excellent compromise between the computational effort and accuracy.



Bathymetry (upper) and computational mesh (lower) used in a MIKE 21 SW application on wave induced currents in Gellen Bay, Germany



Map of significant wave height (upper), current field (middle) and vector field (lower). The flow field is simulated by DHI's MIKE 21 Flow Model FM, which is dynamically coupled to MIKE 21 SW

Model Equations

In MIKE 21 SW, the wind waves are represented by the wave action density spectrum $N(\sigma,\theta)$. The independent phase parameters have been chosen as the relative (intrinsic) angular frequency, $\sigma = 2\pi f$ and the direction of wave propagation, θ. The relation between the relative angular frequency and the absolute angular frequency, ω, is given by the linear dispersion relationship

$$\sigma = \sqrt{gk\tanh(kd)} = \omega - \bar{k}\cdot\bar{U}$$

where g is the acceleration of gravity, d is the water depth and $\bar{U}$ is the current velocity vector and $\bar{k}$ is the wave number vector with magnitude k and direction θ. The action density, $N(\sigma,\theta)$, is related to the energy density $E(\sigma,\theta)$ by

$$N = \frac{E}{\sigma}$$

Fully Spectral Formulation

The governing equation in MIKE 21 SW is the wave action balance equation formulated in either Cartesian or spherical co-ordinates. In horizontal Cartesian co-ordinates, the conservation equation for wave action reads

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla\cdot(\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma}$$

where $N(\bar{x},\sigma,\theta,t)$ is the action density, t is the time, $\bar{x} = (x,y)$ is the Cartesian co-ordinates, $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ is the propagation velocity of a wave group in the four-dimensional phase space $\bar{x}$, σ and θ. S is the source term for energy balance equation. ∇ is the four-dimensional differential operator in the $\bar{x}$, σ, θ-space. The characteristic propagation speeds are given by the linear kinematic relationships

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{c}_g + \bar{U} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right)\frac{\sigma}{k} + \bar{U}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d}\left[\frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U}\cdot\nabla_{\bar{x}} d\right] - c_g\bar{k}\cdot\frac{\partial\bar{U}}{\partial s}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k}\left[\frac{\partial\sigma}{\partial d}\frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k}\cdot\frac{\partial\bar{U}}{\partial m}\right]$$

Here, s is the space co-ordinate in wave direction θ and m is a co-ordinate perpendicular to s. $\nabla_{\bar{x}}$ is the two-dimensional differential operator in the $\bar{x}$-space.

Source Functions

The source function term, S, on the right hand side of the wave action conservation equation is given by

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$

Here S_{in} represents the momentum transfer of wind energy to wave generation, S_{nl} the energy transfer due non-linear wave-wave interaction, S_{ds} the dissipation of wave energy due to white-capping (deep water wave breaking), S_{bot} the dissipation due to bottom friction and S_{surf} the dissipation of wave energy due to depth-induced breaking.

The default source functions S_{in}, S_{nl} and S_{ds} in MIKE 21 SW are similar to the source functions implemented in the WAM Cycle 4 model, see Komen et al (1994).

The wind input is based on Janssen's (1989, 1991) quasi-linear theory of wind-wave generation, where the momentum transfer from the wind to the sea not only depends on the wind stress, but also the sea state itself. The non-linear energy transfer (through the resonant four-wave interaction) is approximated by the DIA approach, Hasselmann et al (1985). The source function describing the dissipation due to white-capping is based on the theory of Hasselmann (1974) and Janssen (1989). The bottom friction dissipation is modelled using the approach by Johnson and Kofoed-Hansen (2000), which depends on the wave and sediment properties. The source function describing the bottom-induced wave breaking is based on the well-proven approach of Battjes and Janssen (1978) and Eldeberky and Battjes (1996).

A detailed description of the various source functions is available in Komen et al (1994) and Sørensen et al (2003), which also includes the references listed above.

Directional Decoupled Parametric Formulation

The directionally decoupled parametric formulation is based on a parameterisation of the wave action conservation equation. Following Holthuijsen et al (1989), the parameterisation is made in the frequency domain by introducing the zeroth and first moment of the wave action spectrum as dependent variables.

A similar formulation is used in the MIKE 21 NSW Near-shore Spectral Wind-Wave Model, which is one of the most popular models for wave transformation in coastal and shallow water environment. However, with MIKE 21 SW it is not necessary to set up a number of different orientated bathymetries to cover varying wind and wave directions.

The parameterisation leads to the following coupled equations

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t}+\frac{\partial(c_x m_0)}{\partial x}+\frac{\partial(c_y m_0)}{\partial y}+\frac{\partial(c_\theta m_0)}{\partial \theta}=T_0$$

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t}+\frac{\partial(c_x m_1)}{\partial x}+\frac{\partial(c_y m_1)}{\partial y}+\frac{\partial(c_\theta m_1)}{\partial \theta}=T_1$$

where $m_0(x, y, \theta)$ and $m_1(x, y, \theta)$ are the zeroth and first moment of the action spectrum $N(x, y, \sigma, \theta)$, respectively. $T_0(x, y, \theta)$ and $T_1(x, y, \theta)$ are source functions based on the action spectrum. The moments $m_n(x, y, \theta)$ are defined as

$$m_n(x,y,\theta)=\int_0^\infty \omega^n N(x,y,\omega,\theta)d\omega$$

The source functions T_0 and T_1 take into account the effect of local wind generation (stationary solution mode only) and energy dissipation due to bottom friction and wave breaking. The effects of wave-current interaction are also included. The source functions for the local wind generation are derived from empirical growth relations, see Johnson (1998) for details.

Numerical Methods

The frequency spectrum (fully spectral model only) is split into a prognostic part for frequencies lower than a cut-off frequency σ_{max} and an analytical diagnostic tail for the high-frequency part of the spectrum

$$E(\sigma,\theta)=E(\sigma_{\max},\theta)\left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}}\right)^{-m}$$

where m is a constant (= 5) as proposed by Komen et al (1994).





The directional decoupled parametric formulation in MIKE 21 SW is used extensively for calculation of the wave transformation from deep-water to the shoreline and for wind-wave generation in local areas

Space Discretisation

The discretisation in geographical and spectral space is performed using cell-centred finite volume method. In the geographical domain an unstructured mesh is used. The spatial domain is discretised by subdivision of the continuum into non-overlapping elements. Triangle and quadrilateral shaped polygons are presently supported in MIKE 21 SW. The action density, $N(\sigma,\theta)$ is represented as a piecewise constant over the elements and stored at the geometric centres.

In frequency space either an equidistant or a log-arithmic discretisation is used. In the directional space, an equidistant discretisation is used for both types of models. The action density is represented as piecewise constant over the discrete intervals, $\Delta\sigma$ and $\Delta\theta$, in the frequency and directional space.

Integrating the wave action conservation over an area A_i, the frequency interval $\Delta\sigma_l$ and the directional interval $\Delta\theta_m$ gives

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{\Delta\theta_m}\int_{\Delta\sigma_l}\int_{A_i} N d\Omega d\sigma d\theta - \int_{\Delta\theta_m}\int_{\Delta\sigma_l}\int_{A_i}\frac{S}{\sigma} d\Omega d\sigma d\theta$$
$$= \int_{\Delta\theta_m}\int_{\Delta\sigma_l}\int_{A_i} \nabla\cdot(\bar{v}N) d\Omega d\sigma d\theta$$

where Ω is the integration variable defined on A_i. Using the divergence theorem and introducing the convective flux $\bar{F} = \bar{v}N$, we obtain

$$\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t} = -\frac{1}{A_i}\left[\sum_{p=1}^{NE}(F_n)_{p,l,m}\Delta l_p\right]$$
$$-\frac{1}{\Delta\sigma_l}\left[(F_\sigma)_{i,l+1/2,m} - (F_\sigma)_{i,l-1/2,m}\right]$$
$$-\frac{1}{\Delta\theta_m}\left[(F_\theta)_{i,l,m+1/2} - (F_\theta)_{i,l,m-1/2}\right] + \frac{S_{i,l,m}}{\sigma_l}$$

where NE is the total number of edges in the cell, $(F_n)_{p,l,m} = (F_x n_x + F_y n_y)_{p,l,m}$ is the normal flux trough the edge p in geographical space with length Δl_p. $(F_\sigma)_{i,l+1/2,m}$ and $(F_\theta)_{i,l,m+1/2}$ is the flux through the face in the frequency and directional space, respectively.

The convective flux is derived using a first-order upwinding scheme. In that

$$F_n = c_n\left(\frac{1}{2}(N_i + N_j) - \frac{1}{2}\frac{c}{|c|}(N_i - N_j)\right)$$

where c_n is the propagation speed normal to the element cell face.

Time Integration

The integration in time is based on a fractional step approach. Firstly, a propagation step is performed calculating an approximate solution N^* at the new time level (n+1) by solving the homogenous wave action conservation equation, i.e. without the source terms. Secondly, a source terms step is performed calculating the new solution N^{n+1} from the estimated solution taking into account only the effect of the source terms.

The propagation step is carried out by an explicit Euler scheme

$$N^*_{i,l,m} = N^n_{i,l,m} + \Delta t\left(\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t}\right)^n$$

To overcome the severe stability restriction, a multi-sequence integration scheme is employed. The maximum allowed time step is increased by employing a sequence of integration steps locally, where the number of steps may vary from point to point.

A source term step is performed using an implicit method (see Komen et al, 1994)

$$N^{n+1}_{i,l,m} = N^*_{i,l,m} + \Delta t\left[\frac{(1-\alpha)S^*_{i,l,m} + \alpha S^{n+1}_{i,l,m}}{\sigma_l}\right]$$

where α is a weighting coefficient that determines the type of finite difference method. Using a Taylor series to approximate S^{n+1} and assuming the off-diagonal terms in $\partial S/\partial E = \gamma$ are negligible, this equation can be simplified as

$$N^{n+1}_{i,l,m} = N^n_{i,l,m} + \frac{(S^*_{i,l,m}/\sigma_l)\Delta t}{(1-\alpha\gamma\Delta t)}$$

For growing waves ($\gamma > 0$) an explicit forward difference is used ($\alpha = 0$), while for decaying waves ($\gamma < 0$) an implicit backward difference ($\alpha = 1$) is applied.



MIKE 21 SW is also applied for wave forecasts in ship route planning and improved service for conventional and fast ferry operators

Model Input

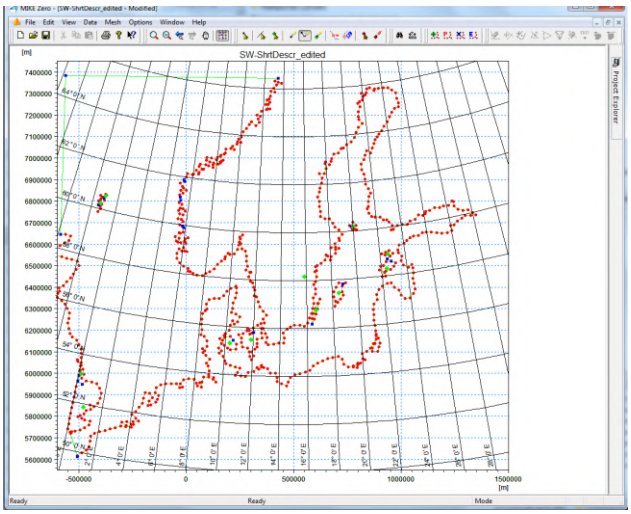
The necessary input data can be divided into following groups:

- Domain and time parameters:
  - computational mesh
  - co-ordinate type (Cartesian or spherical)
  - simulation length and overall time step
- Equations, discretisation and solution technique
  - formulation type
  - frequency and directional discretisation
  - number of time step groups
  - number of source time steps
- Forcing parameters
  - water level data
  - current data
  - wind data
  - ice data
- Source function parameters
  - non-linear energy transfer
  - wave breaking (shallow water)
  - bottom friction
  - white capping
- Structures
  - location and geometry
  - approach
  - structures coefficients
- Initial conditions
  - zero-spectrum (cold-start)
  - empirical data
  - data file
- Boundary conditions
  - closed boundaries
  - open boundaries (data format and type)

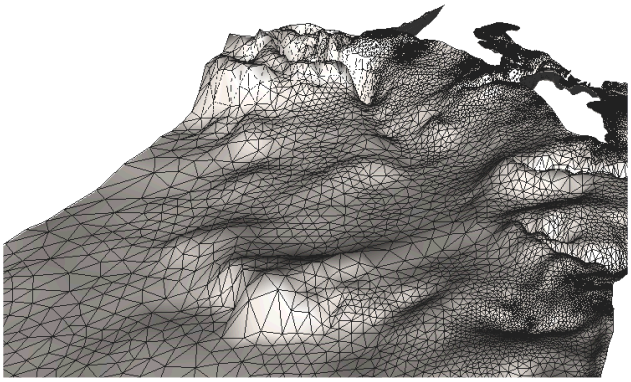
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential and land boundaries.

Furthermore, the resolution in the geographical space must also be selected with respect to stability considerations.

As the wind is the main driving force in MIKE 21 SW, accurate hindcast or forecast wind fields are of utmost importance for the wave prediction.

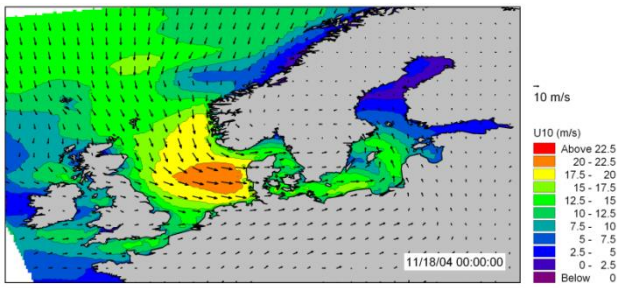


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



3D visualisation of a computational mesh

If wind data is not available from an atmospheric meteorological model, the wind fields (e.g. cyclones) can be determined by using the wind-generating programs available in MIKE 21 Toolbox.

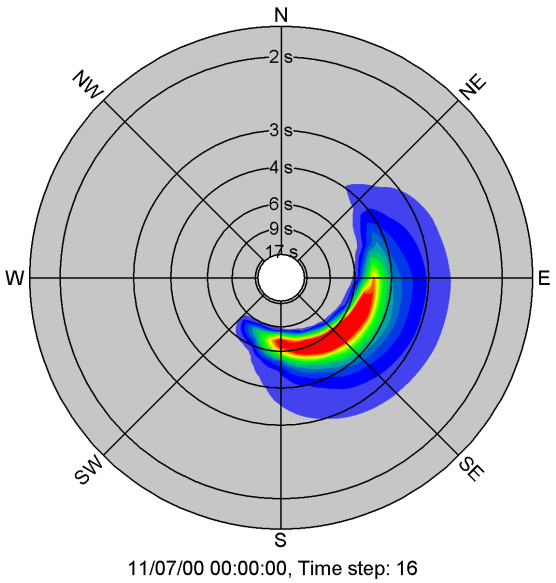


The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

Model Output

At each mesh point and for each time step four types of output can be obtained from MIKE 21 SW:

- Integral wave parameters divided into wind sea and swell such as
  - significant wave height, H_{m0}
  - peak wave period, T_p
  - averaged wave period, T_{01}
  - zero-crossing wave period, T_{02}
  - wave energy period, T_{-10}
  - peak wave direction, θ_p
  - mean wave direction, θ_m
  - directional standard deviation, σ
  - wave height with dir., $H_{m0}\cos\theta_m$, $H_{m0}\sin\theta_m$
  - radiation stress tensor, S_{xx}, S_{xy} and S_{yy}
  - particle velocities, *horizontal/vertical*
  - wave power, P, P_x *and* P_y



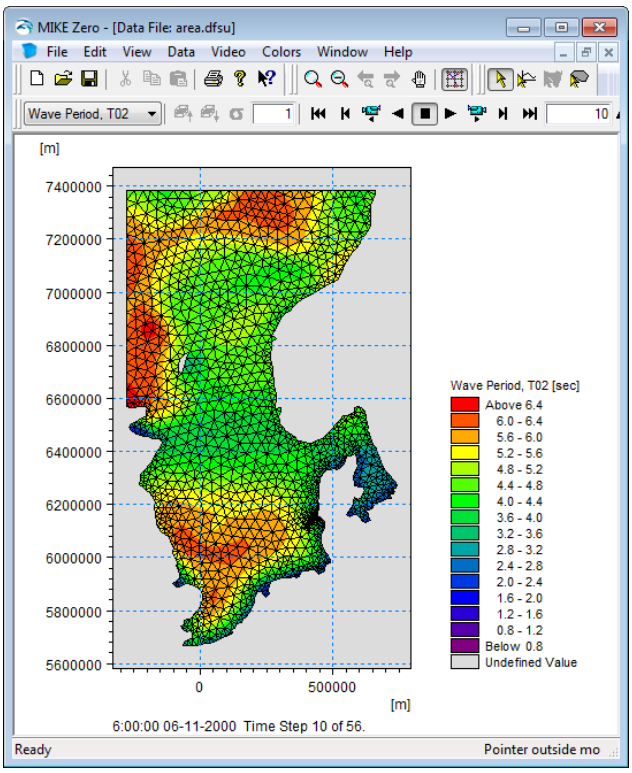
Example of model output (directional-frequency wave spectrum) processed using the Polar Plot control in the MIKE Zero Plot Composer

The distinction between wind-sea and swell can be calculated using either a constant threshold frequency or a dynamic threshold frequency with an upper frequency limit.

- Input parameters
  - water level, *WL*
  - water depth, *h*
  - current velocity, $\overline{U}$
  - wind speed, U_{10}
  - wind direction, θ_w
  - Ice concentration
- Model parameters
  - bottom friction coefficient, C_f
  - breaking parameter, γ
  - Courant number, *Cr*
  - time step factor, α
  - characteristic edge length, Δl
  - area of element, *a*
  - wind friction speed, u_*
  - roughness length, z_0
  - drag coefficient, C_D
  - Charnock parameter, z_{ch}
- Directional-frequency wave spectra at selected grid points and or areas as well as direction spectra and frequency spectra

Output from MIKE 21 SW is typically post-processed using the Data Viewer available in the common MIKE Zero shell. The Data Viewer is a tool for analysis and visualisation of unstructured data, e.g. to view meshes, spectra, bathymetries, results files of different format with graphical extraction of time series and line series from plan view and import of graphical overlays.

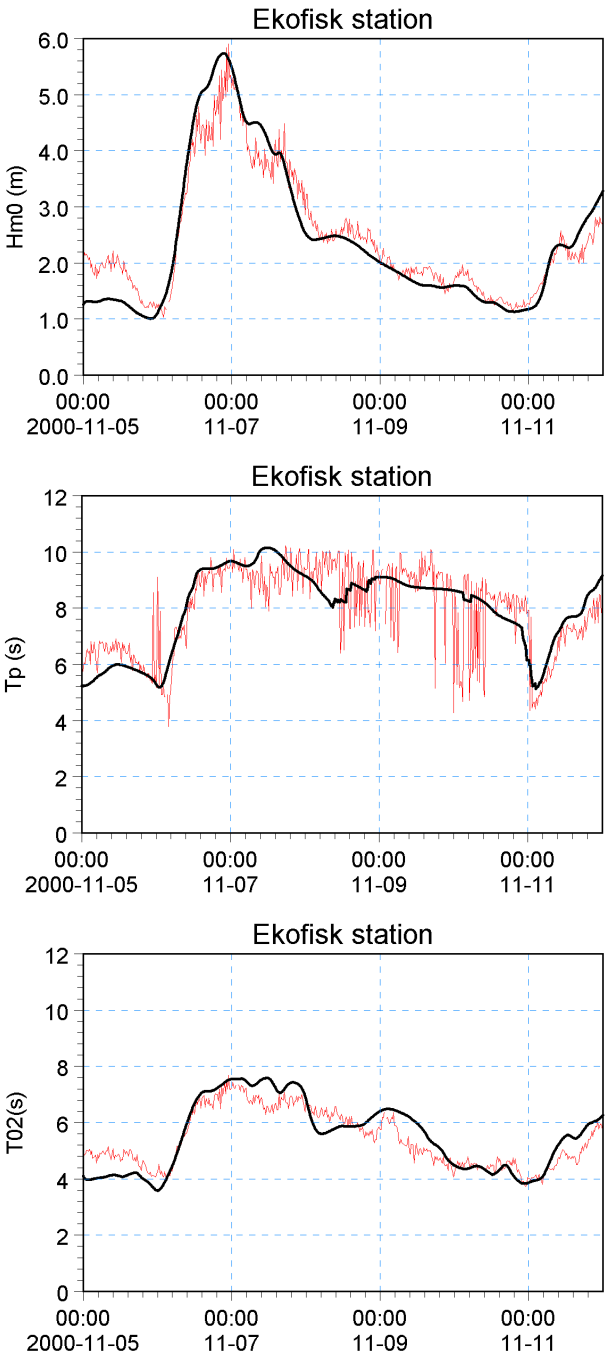
Various other editors and plot controls in the MIKE Zero Composer (e.g. Time Series Plot, Polar Plot, etc.) can be used for analysis and visualisation.



The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualisation of unstructured data including processing of animations

Validation

The model has successfully been applied to a number of rather basic idealised situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature. The basic tests covered fundamental processes such as wave propagation, depth-induced and current-induced shoaling and refraction, wind-wave generation and dissipation.

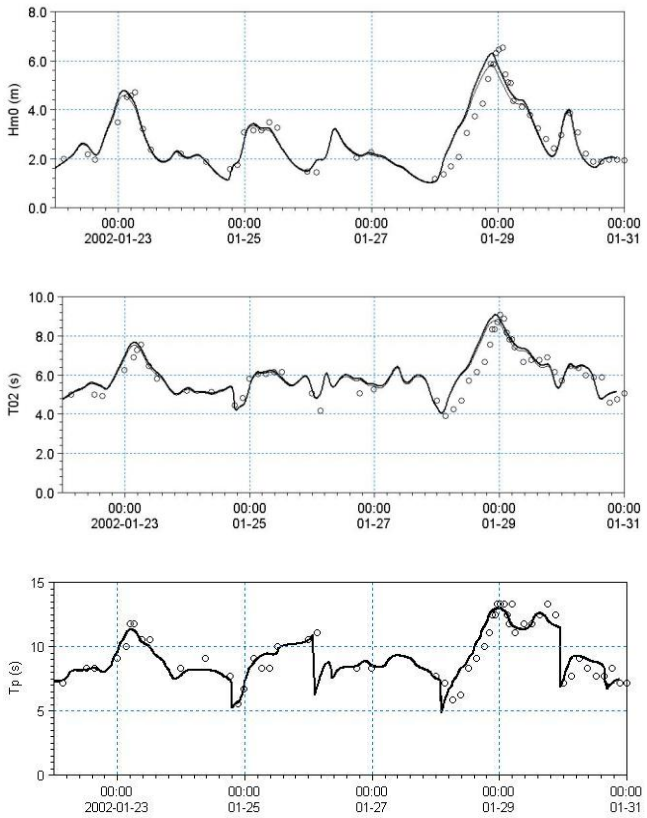


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at the Ekofisk offshore platform (water depth 70 m) in the North Sea). (——) calculations and (——) measurements



A major application area of MIKE 21 SW is in connection with design and maintenance of offshore structures

The model has also been tested in natural geophysical conditions (e.g. in the North Sea, the Danish West Coast and the Baltic Sea), which are more realistic and complicated than the academic test and laboratory tests mentioned above.

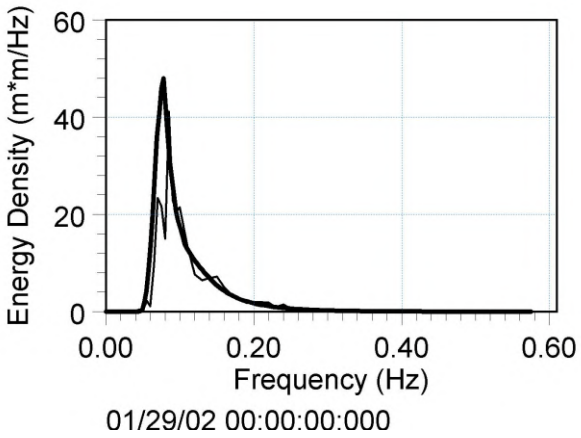


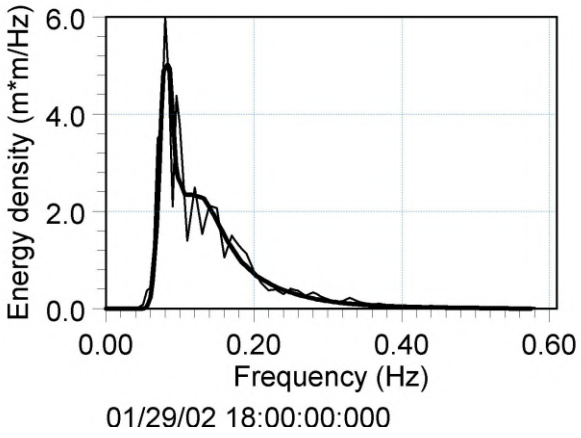
Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m).(——) calculations and (o) measurements



The Fjaltring directional wave rider buoy is located offshore relative to the depicted arrow

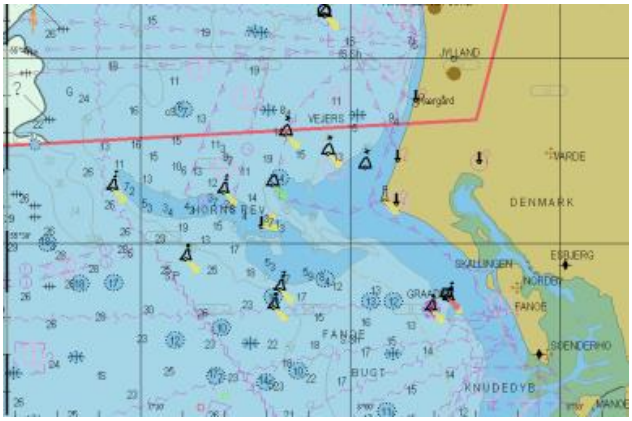
MIKE 21 SW is used for prediction of the wave conditions at the complex Horns Rev (reef) in the southeastern part of the North Sea. At this site, a 168 MW offshore wind farm with 80 turbines has been established in water depths between 6.5 and 13.5 m.

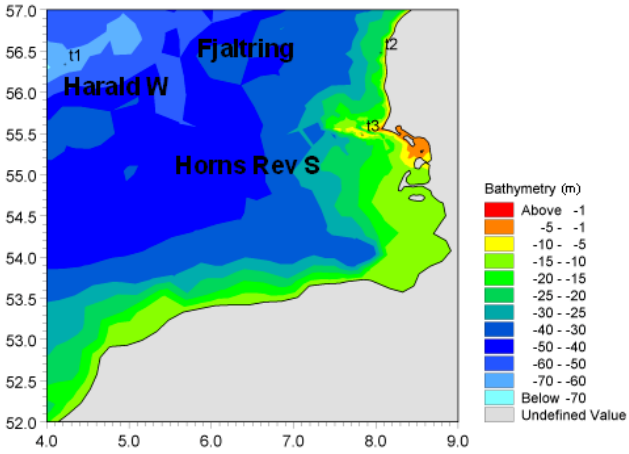


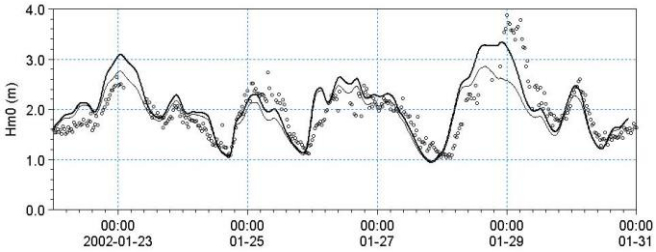


Comparison of frequency spectra at Fjaltring. (——) calculations and (——)measurements



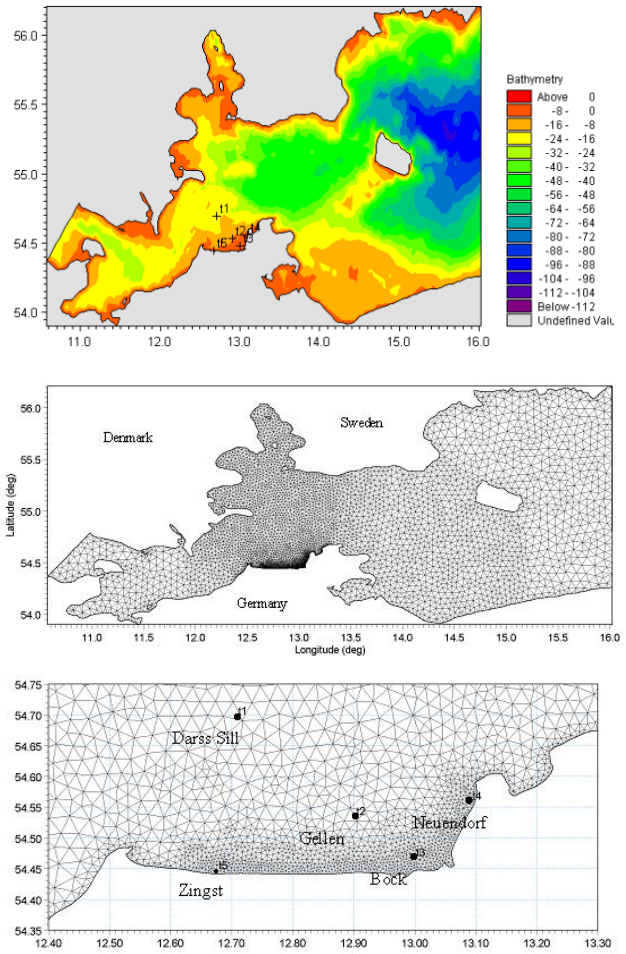




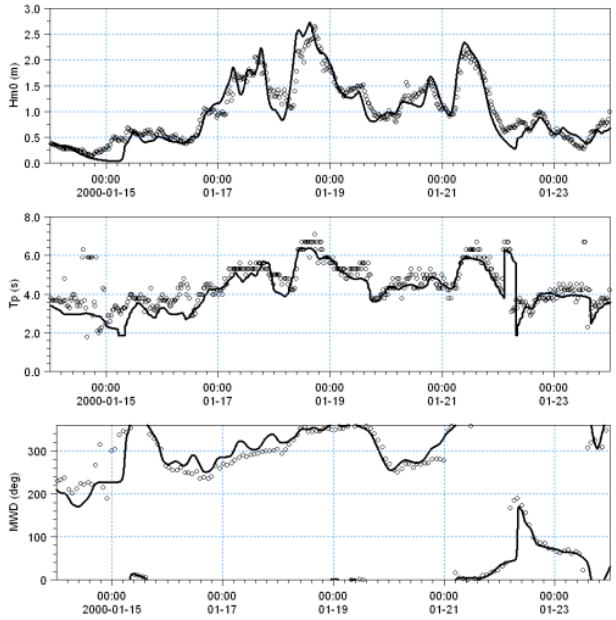


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. 'The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth. The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (——) calculations including tide and surge and (—-) calculations excluding including tide and surge, (o) measurements

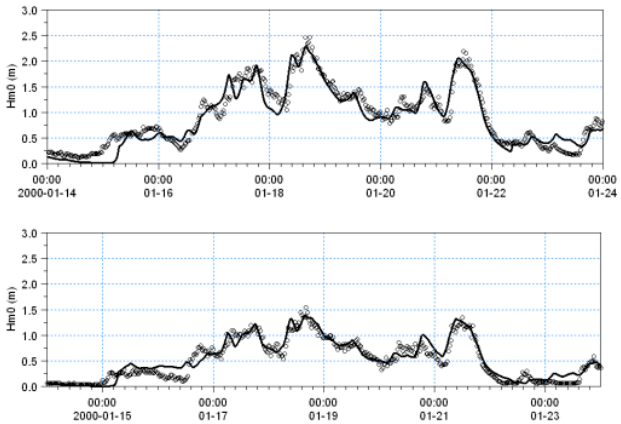
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions are well reproduced both offshore and in more shallow water near the shore. The RMS values (on significant wave height) are less than 0.25m at all five stations.



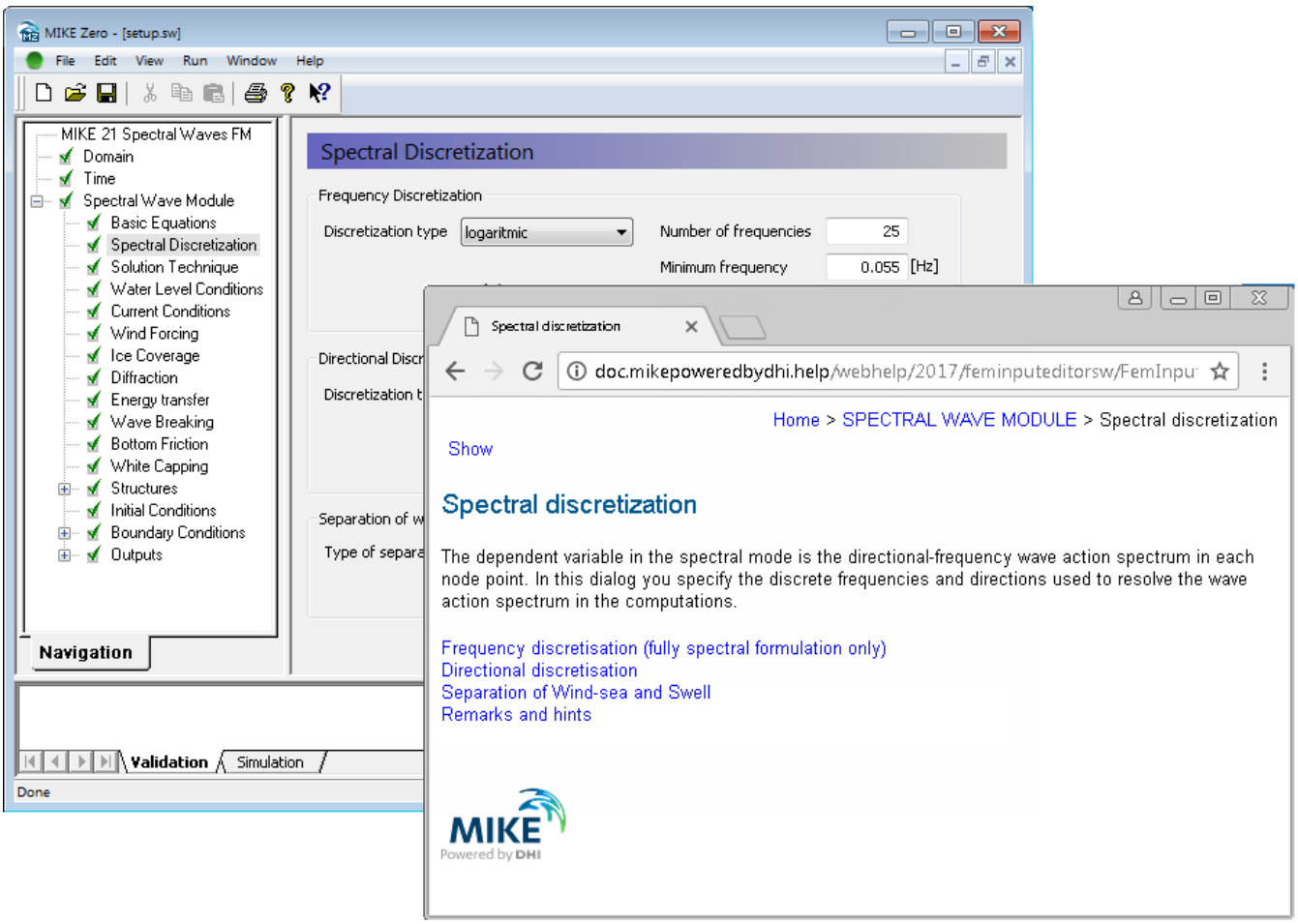
A MIKE 21 SW hindcast application in the Baltic Sea. The upper chart shows the bathymetry and the middle and lower charts show the computational mesh. The lower chart indicates the location of the measurement stations



Time series of significant wave height, H_{m0}, peak wave period, T_p , and mean wave direction, MWD, at Darss sill (Offshore, depth 20.5 m). (——) Calculation and (o) measurements. The RMS value on H_{m0} is approximately 0.2 m



Time series of significant wave height, H_{m0}, at Gellen (upper, depth 8.3m) and Bock (lower, depth 5.5 m). (——) Calculation and (o) measurements. The RMS value on H_{m0} is approximately 0.15 m



Graphical user interface of MIKE 21 SW, including an example of the Online Help System

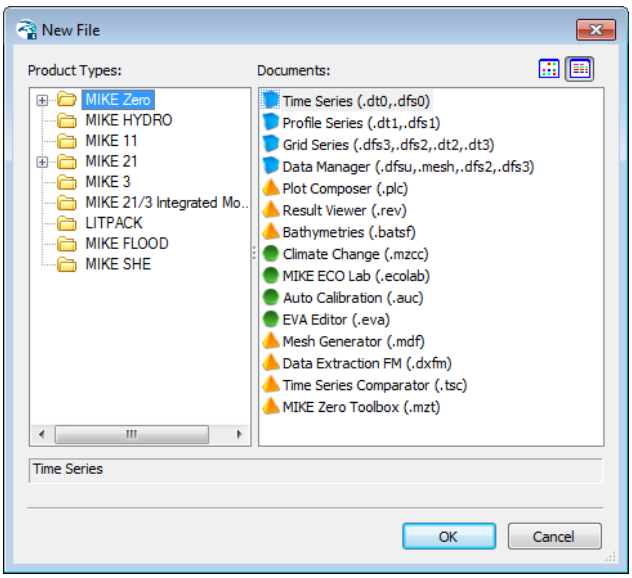
Graphical User Interface

MIKE 21 SW is operated through a fully Windows integrated Graphical User Interface (GUI). Support is provided at each stage by an Online Help System.

The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and a toolbox for/utilities as the Mesh Generator and Data Viewer.



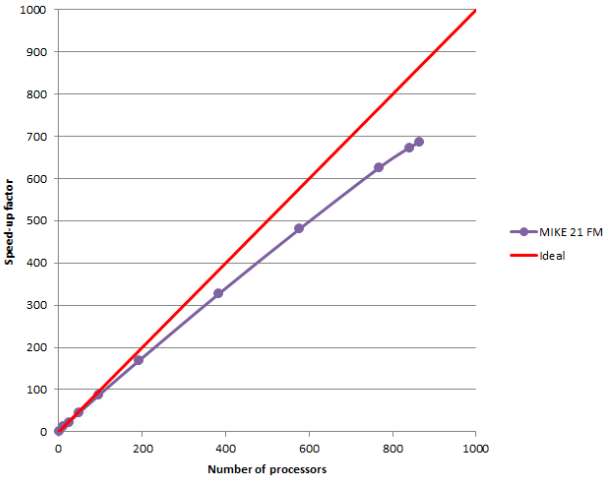
FEMA approval of the MIKE 21 package



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

The computational engines of the MIKE 21/3 FM series are available in versions that have been parallelised using both shared memory as well as distributed memory architecture. The latter approach allows for domain decomposition. The result is much faster simulations on systems with many cores.



Example of MIKE 21 HD FM speed-up using a HPC Cluster with distributed memory architecture (purple)

Hardware and Operating System Requirements

The MIKE Zero Modules support Microsoft Windows 7 Professional Service Pack 1 (64 bit), Windows 10 Pro (64 bit), Windows Server 2012 R2 Standard (64 bit) and Windows Server 2016 Standard (64 bit).

Microsoft Internet Explorer 9.0 (or higher) is required for network license management. An internet browser is also required for accessing the web-based documentation and online help.

The recommended minimum hardware requirements for executing the MIKE Zero modules are:

Processor:	3 GHz PC (or higher)
Memory (RAM):	2 GB (or higher)
Hard disk:	40 GB (or higher)
Monitor:	SVGA, resolution 1024x768
Graphics card: (GUI and visualisation)	64 MB RAM (256 MB RAM or higher is recommended)

Support

News about new features, applications, papers, updates, patches, etc. are available here:

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

For further information on MIKE 21 SW, please contact your local DHI office or the support centre:

MIKE Powered by DHI Client Care
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

Tel: +45 4516 9333
Fax: +45 4516 9292

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Documentation

The MIKE 21 & MIKE 3 FM models are provided with comprehensive user guides, online help, scientific documentation, application examples and step-by-step training examples.



References

Sørensen, O. R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sørensen, L.S., (2004): A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29th International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.

Johnson, H.K., and Kofoed-Hansen, H., (2000). Influence of bottom friction on sea surface roughness and its impact on shallow water wind wave modelling. *J. Phys. Oceanog.,* **30,** 1743-1756.

Johnson, H.K., Vested, H.J., Hersbach, H. Højstrup, J. and Larsen, S.E., (1999). On the coupling between wind and waves in the WAM model. *J. Atmos. Oceanic Technol.,* **16,** 1780-1790.

Johnson, H.K. (1998). On modeling wind-waves in shallow and fetch limited areas using the method of Holthuijsen, Booij and Herbers. *J. Coastal Research,* **14**, 3, 917-932.

Young, I.R., (1999). Wind generated ocean waves, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier.

Komen, G.J., Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann, K., Hasselmann S. and Janssen, P.A.E.M., (1994). Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, UK, 560 pp.

Holthuijsen, L.H, Booij, N. and Herbers, T.H.C. (1989). A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, *Coastal Engr*., **13**, 23-54.

References on Applications

Kofoed-Hansen, H., Johnson, H.K., Højstrup, J. and Lange, B., (1998). Wind-wave modelling in waters with restricted fetches. In: Proc of 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, 27-30 January 1998, Melbourne, FL, USA, pp. 113-127.

Kofoed-Hansen, H, Johnson, H.K., Astrup, P. and Larsen, J., (2001). Prediction of waves and sea surface roughness in restricted coastal waters. In: Proc of 27th International Conference of Coastal Engineering, pp.1169-1182.

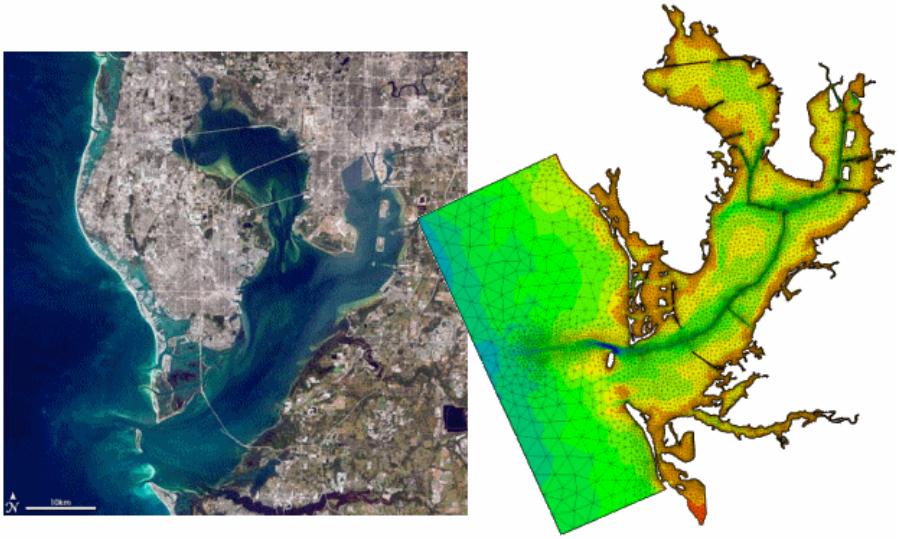
Al-Mashouk, M.A., Kerper, D.R. and Jacobsen, V., (1998). Red Sea Hindcast study: Development of a sea state design database for the Red Sea.. *J Saudi Aramco Technology*, **1**, 10 pp.

Rugbjerg, M., Nielsen, K., Christensen, J.H. and Jacobsen, V., (2001). Wave energy in the Danish part of the North Sea. In: Proc of 4th European Wave Energy Conference, 8 pp.

ALLEGATO C

MIKE 21 Hydrodynamics (HD)

Descrizione tecnica



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

Hydrodynamic Module

Short Description

The expert in WATER ENVIRONMENTS



DHI headquarters
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

+45 4516 9200 Telephone
+45 4516 9333 Support
+45 4516 9292 Telefax

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

MIKE213_HD_FM_Short_Description_.docx / AJS/EBR/NHP / 2017-10-02

© DHI

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

The Flow Model FM is a comprehensive modelling system for two- and three-dimensional water modelling developed by DHI. The 2D and 3D models carry the same names as the classic DHI model versions MIKE 21 & MIKE 3 with an 'FM' added referring to the type of model grid - Flexible Mesh.

The modelling system has been developed for complex applications within oceanographic, coastal and estuarine environments. However, being a general modelling system for 2D and 3D free-surface flows it may also be applied for studies of inland surface waters, e.g. overland flooding and lakes or reservoirs.



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM is a general hydrodynamic flow modelling system based on a finite volume method on an unstructured mesh

The Modules of the Flexible Mesh Series

DHI's Flexible Mesh (FM) series includes the following modules:

Flow Model FM modules

- Hydrodynamic Module, HD
- Transport Module, TR
- Ecology Modules, MIKE ECO Lab/AMB Lab
- Oil Spill Module, OS
- Mud Transport Module, MT
- Particle Tracking Module, PT
- Sand Transport Module, ST
- Shoreline Morphology Module, SM

Wave module

- Spectral Wave Module, SW

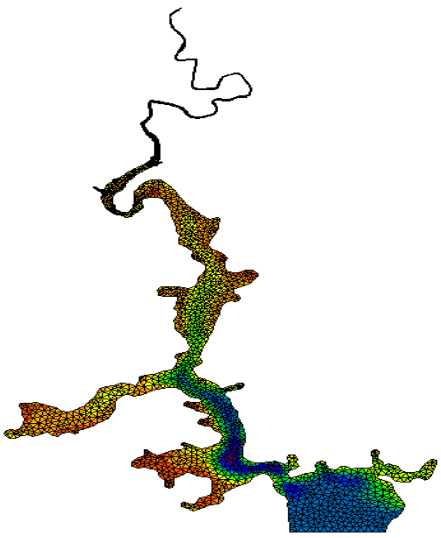
The FM Series meets the increasing demand for realistic representations of nature, both with regard to 'look alike' and to its capability to model coupled processes, e.g. coupling between currents, waves and sediments. Coupling of modules is managed in the Coupled Model FM.

All modules are supported by advanced user interfaces including efficient and sophisticated tools for mesh generation, data management, 2D/3D visualization, etc. In combination with comprehensive documentation and support, the FM series forms a unique professional software tool for consultancy services related to design, operation and maintenance tasks within the marine environment.

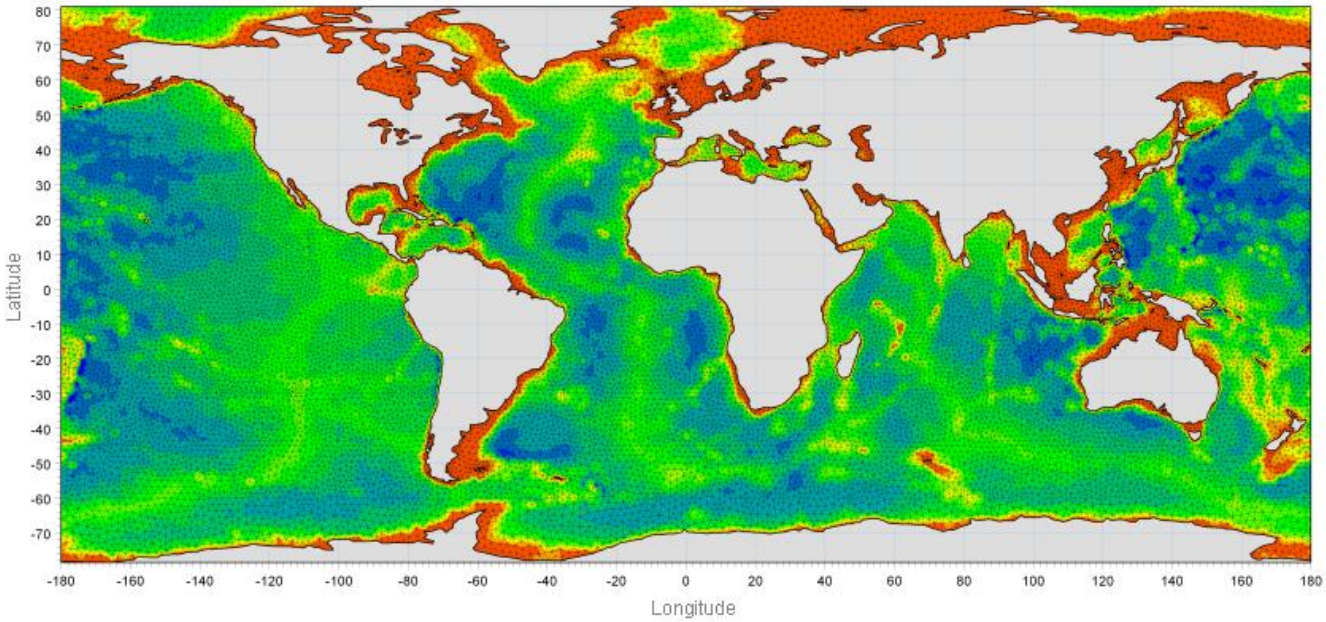
An unstructured grid provides an optimal degree of flexibility in the representation of complex geometries and enables smooth representations of boundaries. Small elements may be used in areas where more detail is desired, and larger elements used where less detail is needed, optimising information for a given amount of computational time.

The spatial discretisation of the governing equations is performed using a cell-centred finite volume method. In the horizontal plane, an unstructured grid is used while a structured mesh is used in the vertical domain (3D).

This document provides a short description of the Hydrodynamic Module included in MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM.



Example of computational mesh for Tamar Estuary, UK



MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM supports both Cartesian and spherical coordinates. Spherical coordinates are usually applied for regional and global sea circulation applications. The chart shows the computational mesh and bathymetry for the planet Earth generated by the MIKE Zero Mesh Generator

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic Module

The Hydrodynamic Module provides the basis for computations performed in many other modules, but can also be used alone. It simulates the water level variations and flows in response to a variety of forcing functions on flood plains, in lakes, estuaries and coastal areas.

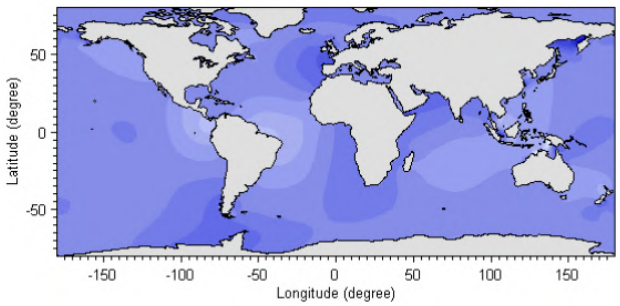
Application Areas

The Hydrodynamic Module included in MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM simulates unsteady flow taking into account density variations, bathymetry and external forcings.

The choice between 2D and 3D model depends on a number of factors. For example, in shallow waters, wind and tidal current are often sufficient to keep the water column well-mixed, i.e. homogeneous in salinity and temperature. In such cases a 2D model can be used. In water bodies with stratification, either by density or by species (ecology), a 3D model should be used. This is also the case for enclosed or semi-enclosed waters where wind-driven circulation occurs.

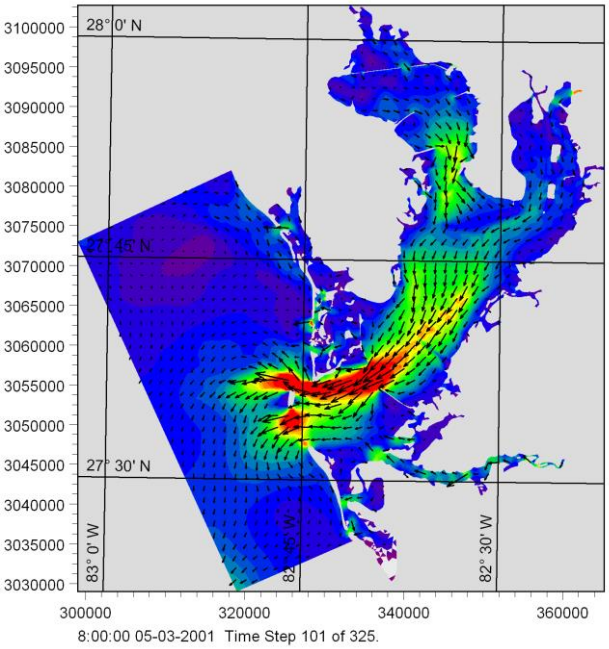
Typical application areas are

- Assessment of hydrographic conditions for design, construction and operation of structures and plants in stratified and non-stratified waters
- Environmental impact assessment studies
- Coastal and oceanographic circulation studies
- Optimization of port and coastal protection infrastructures
- Lake and reservoir hydrodynamics
- Cooling water, recirculation and desalination
- Coastal flooding and storm surge
- Inland flooding and overland flow modelling
- Forecast and warning systems

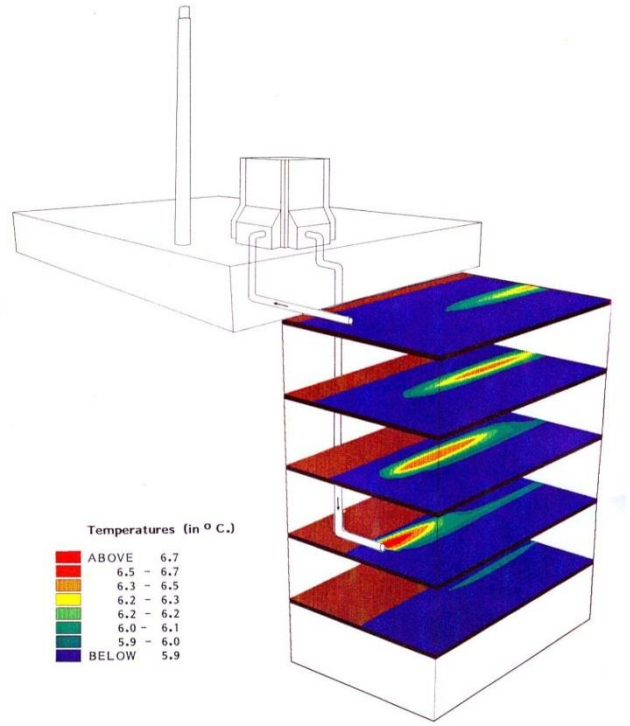


Example of a global tide application of MIKE 21 Flow Model FM. Results from such a model can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM also support spherical coordinates, which makes both models particularly applicable for global and regional sea scale applications.



Example of a flow field in Tampa Bay, Florida, simulated by MIKE 21 Flow Model FM

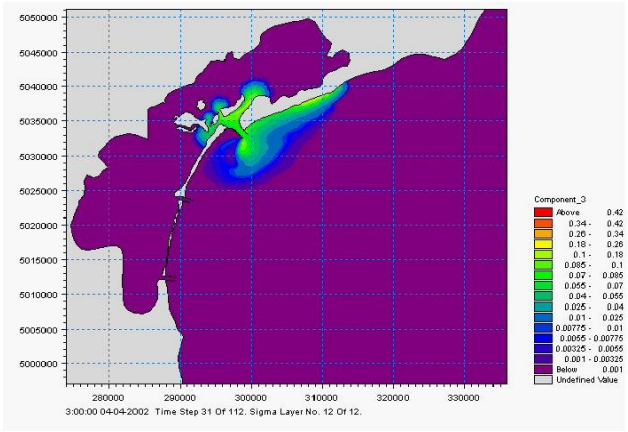


Study of thermal plume dispersion



Typical applications with the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM include cooling water recirculation and ecological impact assessment (eutrophication)

The Hydrodynamic Module is together with the Transport Module (TR) used to simulate the spreading and fate of dissolved and suspended substances. This module combination is applied in tracer simulations, flushing and simple water quality studies.



Tracer simulation of single component from outlet in the Adriatic, simulated by MIKE 21 Flow Model FM HD+TR



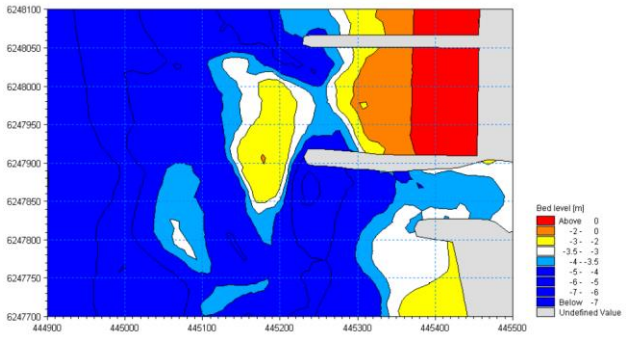
Prediction of ecosystem behaviour using the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM together with MIKE ECO Lab

The Hydrodynamic Module can be coupled to the Ecological Module (MIKE ECO Lab) to form the basis for environmental water quality studies comprising multiple components.

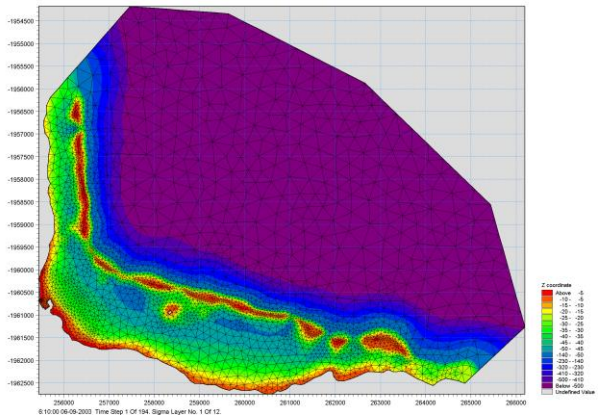
Furthermore, the Hydrodynamic Module can be coupled to sediment models for the calculation of sediment transport. The Sand Transport Module and Mud Transport Module can be applied to simulate transport of non-cohesive and cohesive sediments, respectively.

In the coastal zone the transport is mainly determined by wave conditions and associated wave-induced currents. The wave-induced currents are generated by the gradients in radiation stresses that occur in the surf zone. The Spectral Wave Module can be used to calculate the wave conditions and associated radiation stresses.

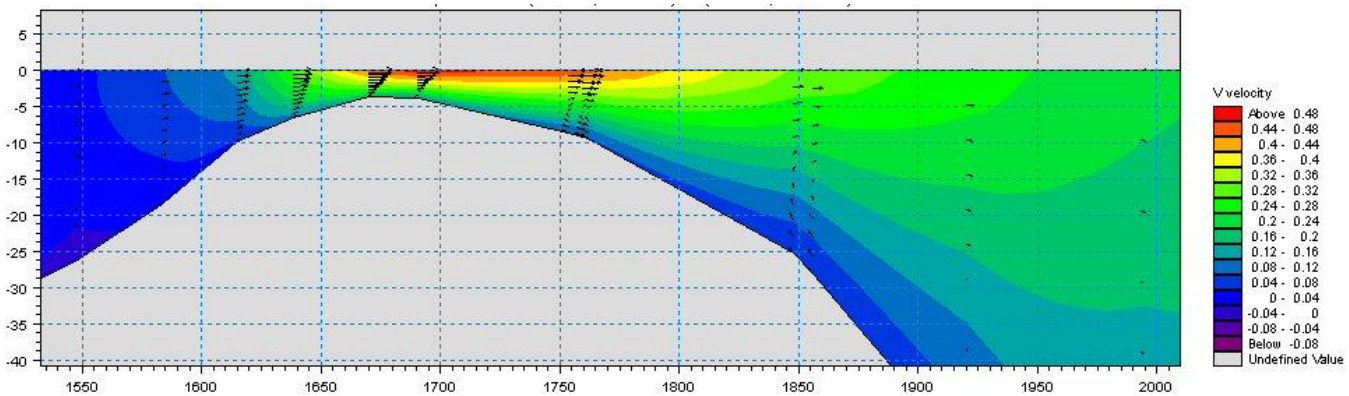




Coastal application (morphology) with coupled MIKE 21 HD, SW and ST, Torsminde harbour Denmark



Model bathymetry of Taravao Bay, Tahiti



Example of vertical profile of cross reef currents in Taravao Bay, Tahiti simulated with MIKE 3 Flow Model FM. The circulation and renewal of water inside the reef is dependent on the tides, the meteorological conditions and the cross reef currents, thus the circulation model includes the effects of wave induced cross reef currents

Computational Features

The main features and effects included in simulations with the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM – Hydrodynamic Module are the following:

- Flooding and drying
- Momentum dispersion
- Bottom shear stress
- Coriolis force
- Wind shear stress
- Barometric pressure gradients
- Ice coverage
- Tidal potential
- Precipitation/evaporation
- Infiltration
- Heat exchange with atmosphere
- Wave radiation stresses
- Sources and sinks, incl. jet
- Structures

Model Equations

The modelling system is based on the numerical solution of the two/three-dimensional incompressible Reynolds averaged Navier-Stokes equations subject to the assumptions of Boussinesq and of hydrostatic pressure. Thus, the model consists of continuity, momentum, temperature, salinity and density equations and it is closed by a turbulent closure scheme. The density does not depend on the pressure, but only on the temperature and the salinity.

For the 3D model, the free surface is taken into account using a sigma-coordinate transformation approach or using a combination of a sigma and z-level coordinate system.

Below the governing equations are presented using Cartesian coordinates.

The local continuity equation is written as

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=S$$

and the two horizontal momentum equations for the x- and y-component, respectively

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial u^2}{\partial x}+\frac{\partial vu}{\partial y}+\frac{\partial wu}{\partial z}=fv-g\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x}-\frac{g}{\rho_0}\int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x}dz+F_u+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t\frac{\partial u}{\partial z}\right)+u_sS$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\partial v^2}{\partial y}+\frac{\partial uv}{\partial x}+\frac{\partial wv}{\partial z}=-fu-g\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y}-\frac{g}{\rho_0}\int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y}dz+F_v+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t\frac{\partial v}{\partial z}\right)+v_sS$$

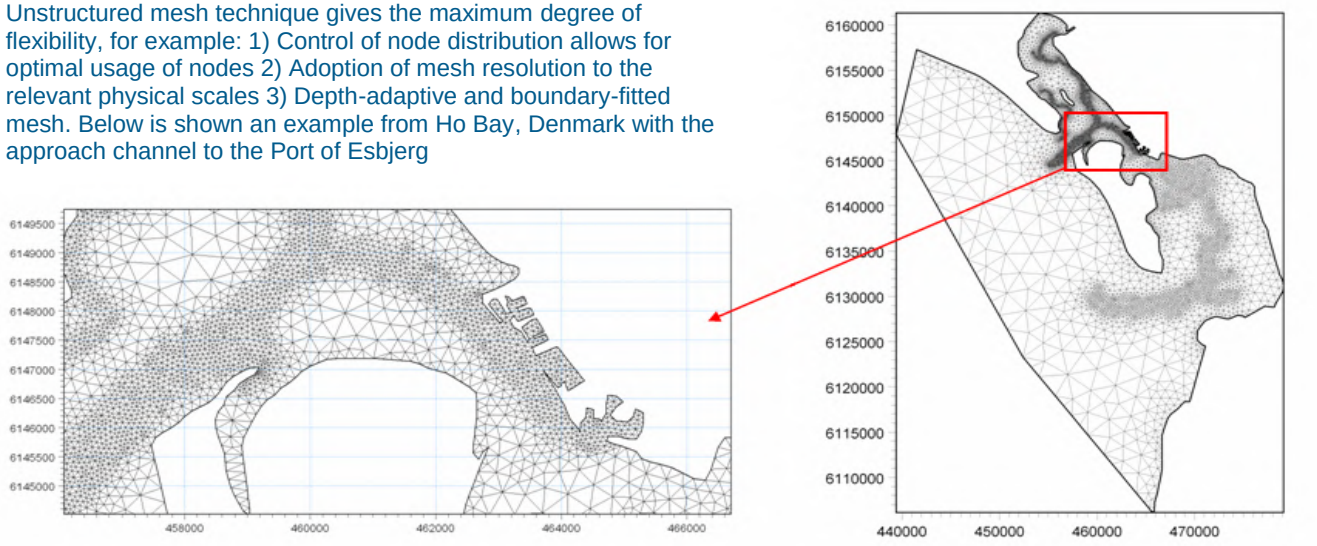
Temperature and salinity

In the Hydrodynamic Module, calculations of the transports of temperature, *T*, and salinity, *s* follow the general transport-diffusion equations as

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial vT}{\partial y}+\frac{\partial wT}{\partial z}=F_T+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_v\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\hat{H}+T_sS$$

$$\frac{\partial s}{\partial t}+\frac{\partial us}{\partial x}+\frac{\partial vs}{\partial y}+\frac{\partial ws}{\partial z}=F_s+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_v\frac{\partial s}{\partial z}\right)+s_sS$$

Unstructured mesh technique gives the maximum degree of flexibility, for example: 1) Control of node distribution allows for optimal usage of nodes 2) Adoption of mesh resolution to the relevant physical scales 3) Depth-adaptive and boundary-fitted mesh. Below is shown an example from Ho Bay, Denmark with the approach channel to the Port of Esbjerg



The horizontal diffusion terms are defined by

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(D_h \frac{\partial}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_h \frac{\partial}{\partial y}\right)\right](T, s)$$

The equations for two-dimensional flow are obtained by integration of the equations over depth.

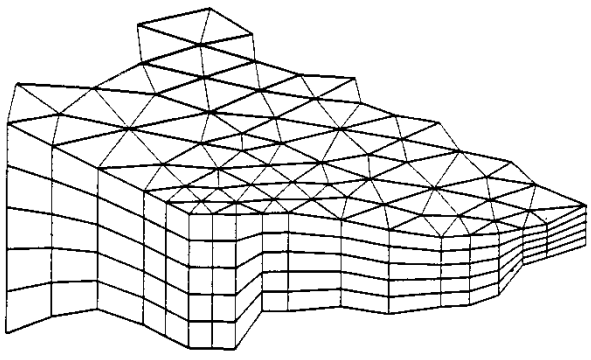
Heat exchange with the atmosphere is also included.

Symbol list

t	time
x, y, z	Cartesian coordinates
u, v, w	flow velocity components
T, s	temperature and salinity
D_v	vertical turbulent (eddy) diffusion coefficient
$\hat{H}$	source term due to heat exchange with atmosphere
S	magnitude of discharge due to point sources
T_s, s_s	temperature and salinity of source
F_T, F_s, F_c	horizontal diffusion terms
D_h	horizontal diffusion coefficient
h	depth

Solution Technique

The spatial discretisation of the primitive equations is performed using a cell-centred finite volume method. The spatial domain is discretised by subdivision of the continuum into non-overlapping elements/cells.



Principle of 3D mesh

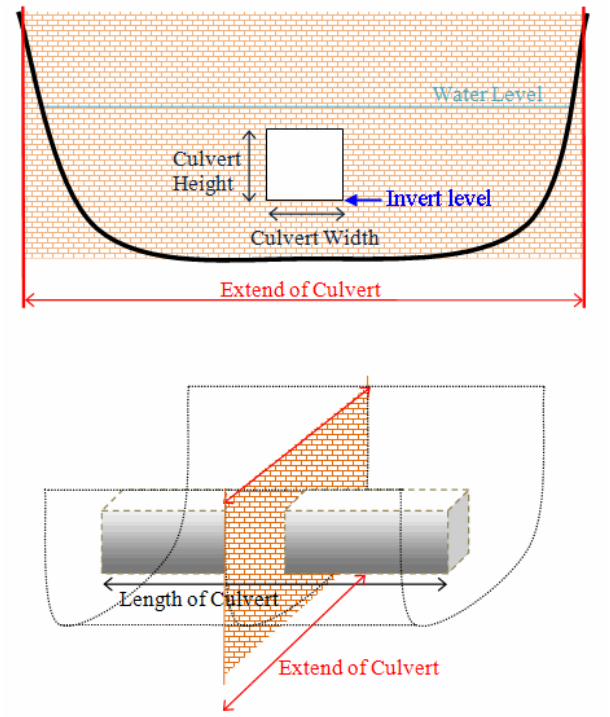
In the horizontal plane an unstructured mesh is used while a structured mesh is used in the vertical domain of the 3D model. In the 2D model the elements can be triangles or quadrilateral elements. In the 3D model the elements can be prisms or bricks whose horizontal faces are triangles and quadrilateral elements, respectively.

The effect of a number of structure types (weirs, culverts, dikes, gates, piers and turbines) with a horizontal dimension which usually cannot be resolved by the computational mesh is modelled by a subgrid technique.

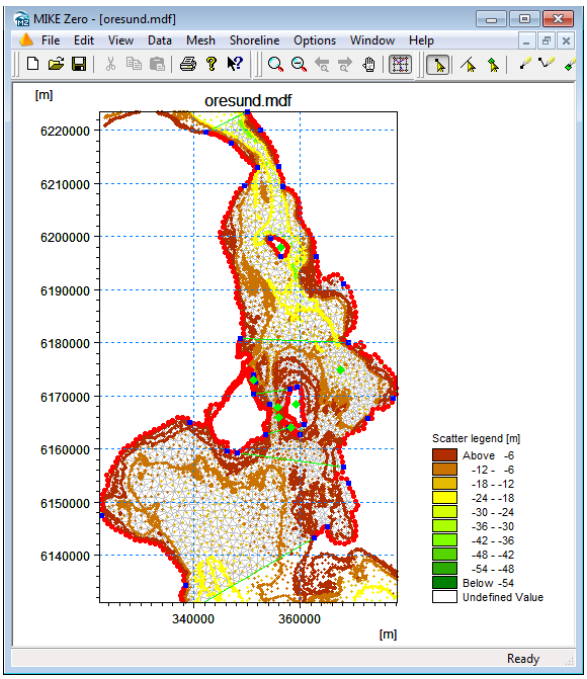
Model Input

Input data can be divided into the following groups:

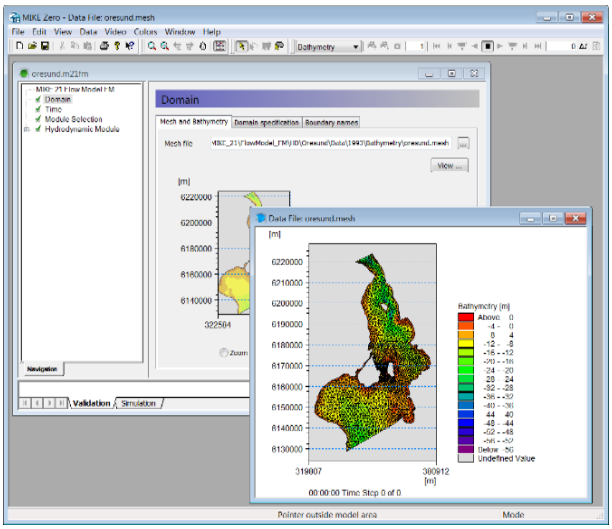
- Domain and time parameters:
  - computational mesh (the coordinate type is defined in the computational mesh file) and bathymetry
  - simulation length and overall time step
- Calibration factors
  - bed resistance
  - momentum dispersion coefficients
  - wind friction factors
  - heat exchange coefficients
- Initial conditions
  - water surface level
  - velocity components
  - temperature and salinity
- Boundary conditions
  - closed
  - water level
  - discharge
  - temperature and salinity
- Other driving forces
  - wind speed and direction
  - tide
  - source/sink discharge
  - wave radiation stresses
- Structures
  - Structure type
  - location
  - structure data



Setup definition of culvert structure



The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



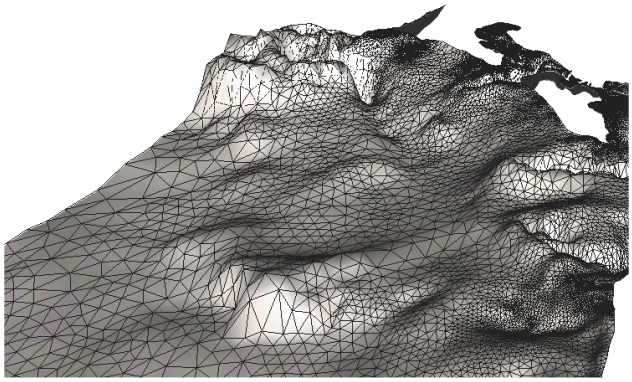
View button on all the GUIs in MIKE 21 & MIKE 3 FM HD for graphical view of input and output files

Providing MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the models. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for defining boundaries.



2D visualization of a computational mesh (Odense Estuary)

Bathymetric values for the mesh generation can e.g. be obtained from the MIKE Powered by DHI product MIKE C-Map. MIKE C-Map is an efficient tool for extracting depth data and predicted tidal elevation from the world-wide Electronic Chart Database CM-93 Edition 3.0 from C-MAP Norway.

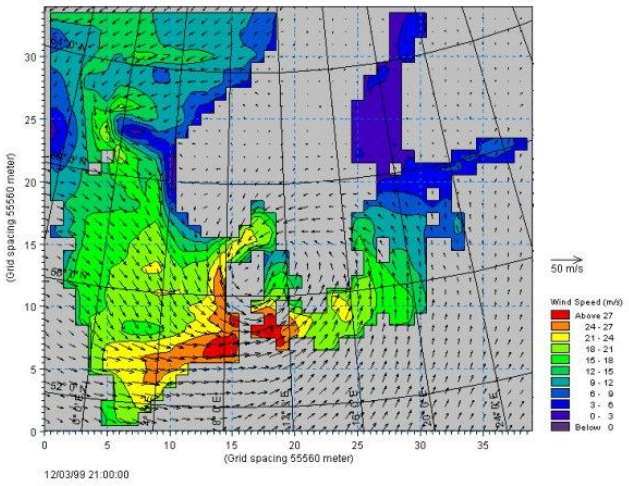


3D visualization of a computational mesh

If wind data is not available from an atmospheric meteorological model, the wind fields (e.g. cyclones) can be determined by using the wind-generating programs available in MIKE 21 Toolbox.

Global winds (pressure & wind data) can be downloaded for immediate use in your simulation. The sources of data are from GFS courtesy of NCEP, NOAA. By specifying the location, orientation and grid dimensions, the data is returned to you in the correct format as a spatial varying grid series or a time series. The link is:

http://www.waterforecast.com/hindcastdataproducts



The chart shows a hindcast wind field over the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction

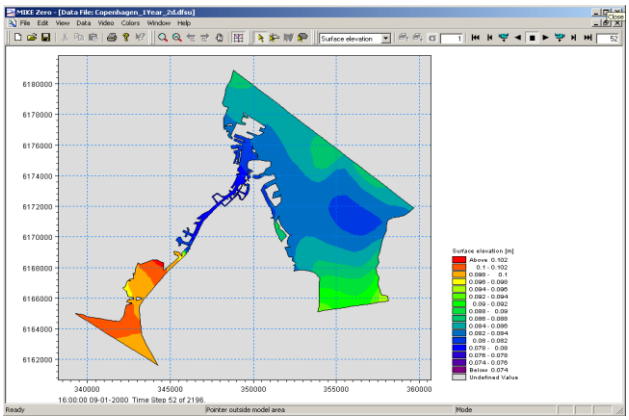
Model Output

Computed output results at each mesh element and for each time step consist of:

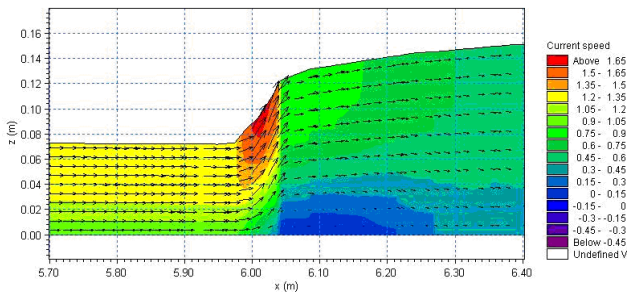
- Basic variables
  - water depths and surface elevations
  - flux densities in main directions
  - velocities in main directions
  - densities, temperatures and salinities
- Additional variables
  - Current speed and direction
  - Wind velocity
  - Air pressure
  - Drag coefficient
  - Precipitation/evaporation
  - Courant/CFL number
  - Eddy viscosity
  - Element area/volume

The output results can be saved in defined points, lines and areas. In the case of 3D calculations, the results are saved in a selection of layers.

Output from MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM is typically post-processed using the Data Viewer available in the common MIKE Zero shell. The Data Viewer is a tool for analysis and visualization of unstructured data, e.g. to view meshes, spectra, bathymetries, results files of different format with graphical extraction of time series and line series from plan view and import of graphical overlays.



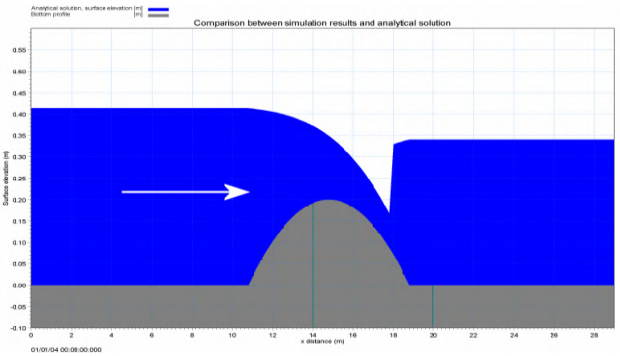
The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualization of unstructured data including processing of animations. Above screen dump shows surface elevations from a model setup covering Port of Copenhagen



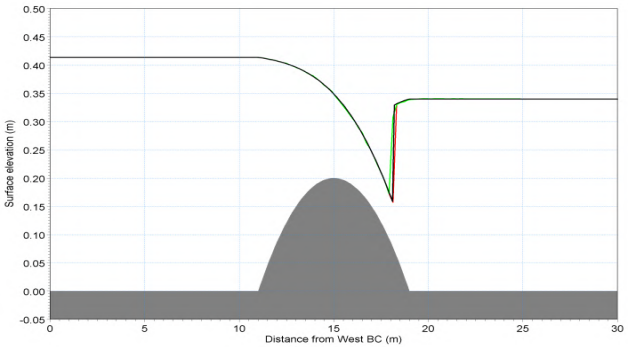
Vector and contour plot of current speed at a vertical profile defined along a line in Data Viewer in MIKE Zero

Validation

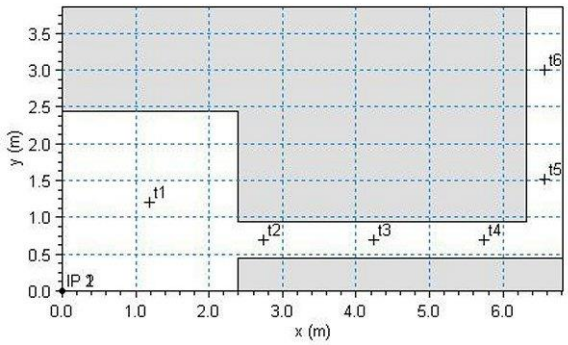
Prior to the first release of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM in year 19xx the model has successfully been applied to a number of basic idealized situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature.



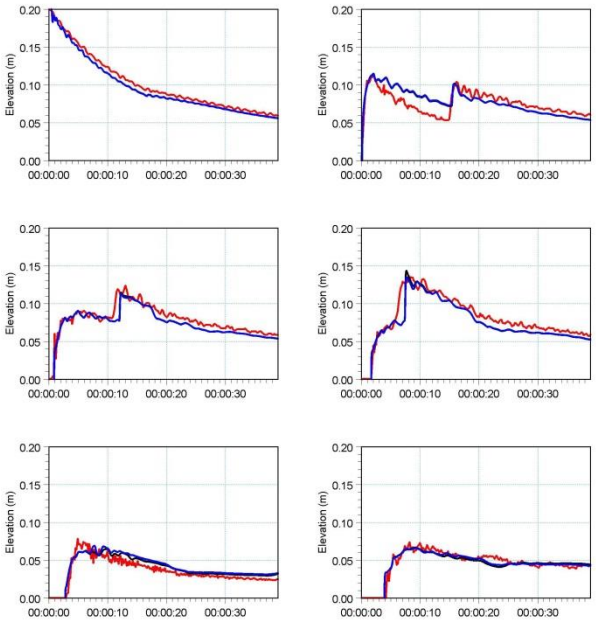
The domain is a channel with a parabola-shaped bump in the middle. The upstream (western) boundary is a constant flux and the downstream (eastern) boundary is a constant elevation. Below: the total depths for the stationary hydraulic jump at convergence. Red line: 2D setup, green line: 3D setup, black line: analytical solution



A dam-break flow in an L-shaped channel (a, b, c):

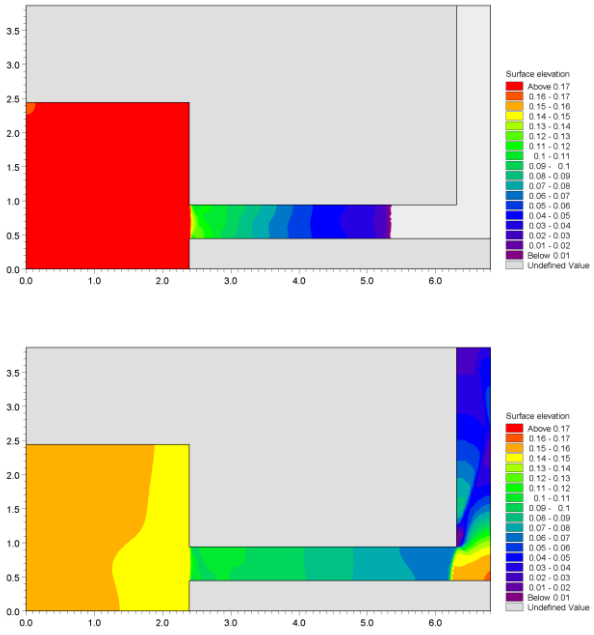


a) Outline of model setup showing the location of gauging points



b) Comparison between simulated and measured water levels at the six gauge locations.
(Blue) coarse mesh solution (black) fine mesh solution and (red) measurements

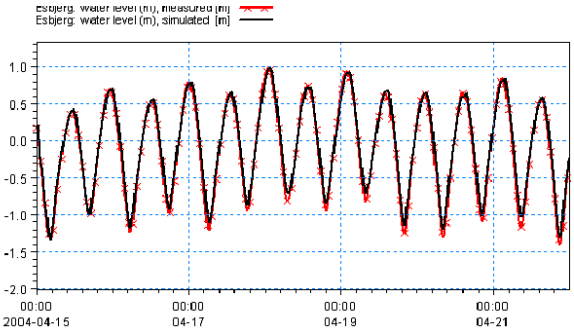
The model has also been applied and tested in numerous natural geophysical conditions; ocean scale, inner shelves, estuaries, lakes and overland, which are more realistic and complicated than academic and laboratory tests.



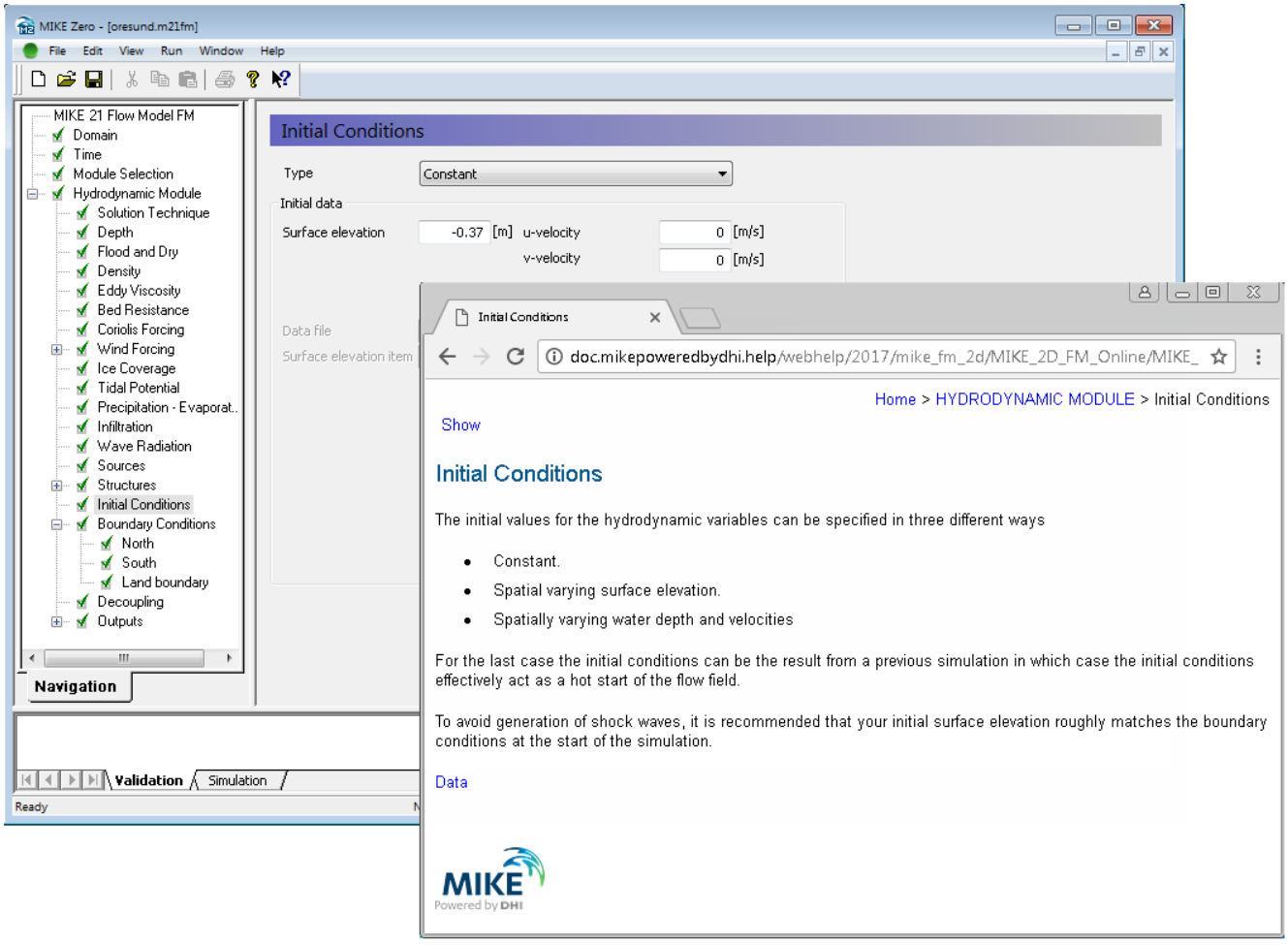
c) Contour plots of the surface elevation at T = 1.6 s (top) and T = 4.8 s (bottom)



Example from Ho Bay, a tidal estuary (barrier island coast) in South-West Denmark with access channel to the Port of Esbjerg.



Comparison between measured and simulated water levels

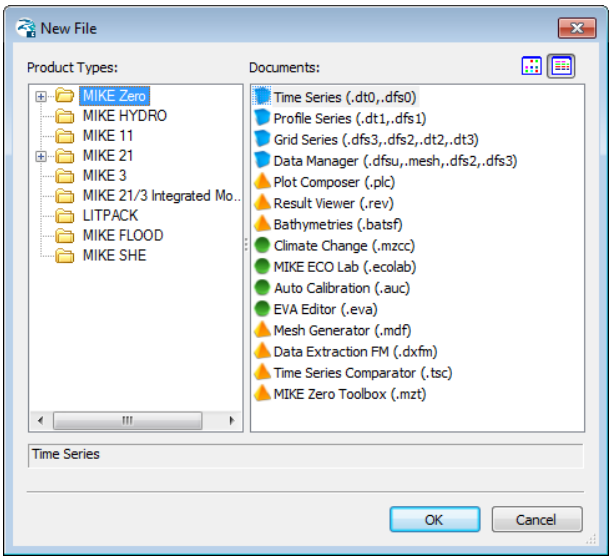


The user interface of the MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM (Hydrodynamic Module), including an example of the extensive Online Help system

Graphical User Interface

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Hydrodynamic Module is operated through a fully Windows integrated graphical user interface (GUI). Support is provided at each stage by an Online Help system.

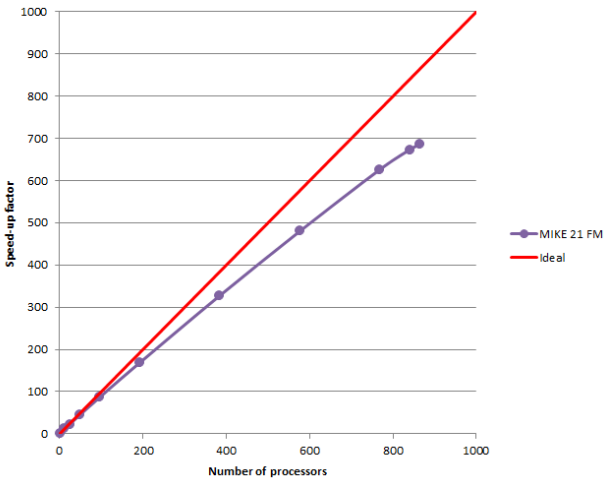
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and utilities such as the Mesh Generator and Data Viewer.



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

The computational engines of the MIKE 21 & MIKE 3 FM series are available in versions that have been parallelised using both shared memory as well as distributed memory architecture. The latter approach allows for domain decomposition. The result is much faster simulations on systems with multiple cores. It is also possible to use a graphics card (GPU) to perform computational intensive hydrodynamic computations.



Example of MIKE 21 HD FM speed-up using a HPC Cluster with distributed memory architecture (purple)

Hardware and Operating System Requirements

The MIKE Zero Modules support Microsoft Windows 7 Professional Service Pack 1 (64 bit), Windows 10 Pro (64 bit), Windows Server 2012 R2 Standard (64 bit) and Windows Server 2016 Standard (64 bit).

Microsoft Internet Explorer 9.0 (or higher) is required for network license management. An internet browser is also required for accessing the web-based documentation and online help.

The recommended minimum hardware requirements for executing the MIKE Zero modules are:

Processor:	3 GHz PC (or higher)
Memory (RAM):	2 GB (or higher)
Hard disk:	40 GB (or higher)
Monitor:	SVGA, resolution 1024x768
Graphics card: (GUI and visualisation)	64 MB RAM (256 MB RAM or higher is recommended)
Graphics card: (for GPU computation)	1 GB RAM (or higher). requires a NVIDIA graphics card with compute capability 2.0 or higher

Support

News about new features, applications, papers, updates, patches, etc. are available here:

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

For further information on MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM software, please contact your local DHI office or the support centre:

MIKE Powered by DHI Client Care
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

Tel: +45 4516 9333
Fax: +45 4516 9292

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Further Reading

Petersen, N.H., Rasch, P. “Modelling of the Asian Tsunami off the Coast of Northern Sumatra”, presented at the 3rd Asia-Pacific DHI Software Conference in Kuala Lumpur, Malaysia, 21-22 February, 2005

French, B. and Kerper, D. Salinity Control as a Mitigation Strategy for Habitat Improvement of Impacted Estuaries. 7th Annual EPA Wetlands Workshop, NJ, USA 2004.

DHI Note, “Flood Plain Modelling using unstructured Finite Volume Technique” January 2004 – download from

http://www.theacademybydhi.com/research-and-publications/scientific-publications

Documentation

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM models are provided with comprehensive user guides, online help, scientific documentation, application examples and step-by-step training examples.



ALLEGATO D

Littoral Process (LitDrift)

Descrizione tecnica

DHI Software

DHI WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics

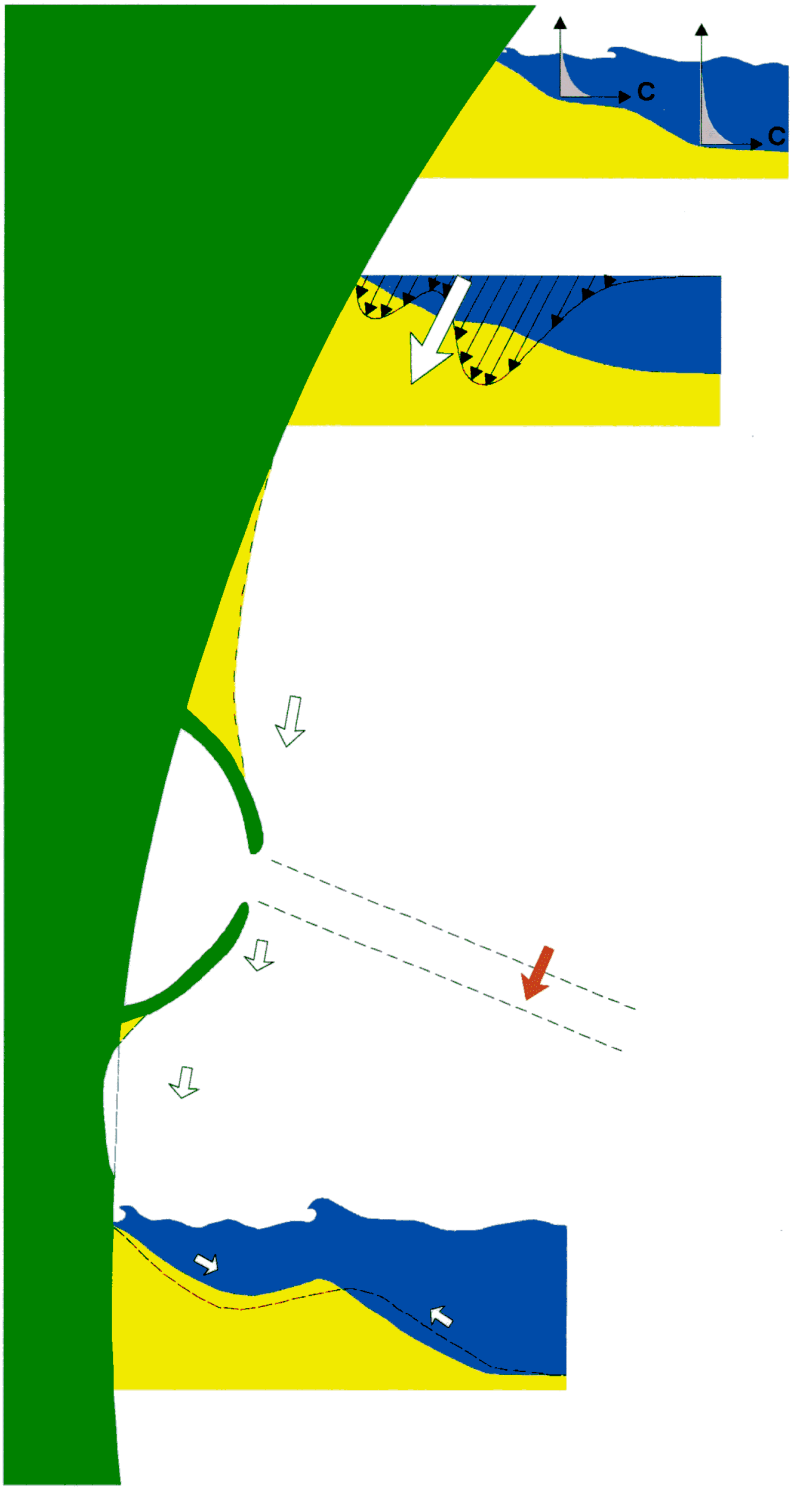


A Short Description

DHI
WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

- FOR FOR MODELLING OF COASTAL PROCESSES



Noncohesive sediment transport in combined waves and current
STP

Littoral drift along a uniform beach with an arbitrary coastal profile
LITDRIFT

Coastline development due to changes in transport capacity
LITLINE

Channel backfilling due to nonequilibrium sediment transport mechanisms
LITTREN

Profile development due to cross-shore transport
LITPROF

LITPACK – LITTORAL TRANSPORT AND COASTLINE KINETICS

Introduction

LITPACK is a 'stand-alone' deterministic numerical modelling system, describing the major processes in the nearshore zone. LITPACK integrates DHI's proven numerical models for coastal sediment transport and coastline development, in a single package suitable for a wide range of coastal engineering applications.

The individual modules of LITPACK simulate particular coastal processes, with the linking between modules being performed by an automatic control module. This allows rapid simulation of complex coastal problems, without loss of detail in the individual modules.

All LITPACK modules apply a fully deterministic approach. This allows consideration of many, and sometimes dominating, factors which are not available to semi-empirical formulations. For example the simulation of a complex multi-barred profile, with varying grain size distribution, is prone to gross error when using an energy flux approach.

The processes covered by the individual modules can broadly be described as:

STP - Non-cohesive sediment transport in waves and currents

LITDRIFT - Longshore current and littoral drift

LITLINE - Coastline evolution

LITTREN - Trench sedimentation

LITPROF - Cross-shore profile development

General Overview

A short description of applications, basic equations and solution techniques for each of the LITPACK modules is presented on the following pages.

The Sediment Transport Module, STP

The computational module STP calculates the non-cohesive sediment transport in combined waves and currents.

The STP Module is integrated in the other LITPACK modules and forms the basis for all sediment transport calculations in LITPACK – and in DHI's 2D modelling system, MIKE 21, as well!

STP solves the vertical sediment diffusion equation on an intra-wave period grid to provide a detailed description of the non-cohesive sediment transport for breaking/non-breaking waves and current.

STP accounts for:

- Waves and currents at arbitrary angles
- Breaking/non-breaking waves
- Plane/ripple-covered bed
- Uniform/graded bed material
- Effect of bed slope
- Effect of streaming

Application Areas

STP is the basis for all sediment transport modelling within LITPACK, but can also be applied for investigating harbour siltation and intake problems.

Basic Equations

The 'intra-wave period' sediment transport model STP forms the basic sediment transport description for combined wave and current action in all the LITPACK modules.

In combined waves and current the turbulent interaction in the near bed boundary layer is of importance for the bed shear stresses as well as for the eddy viscosity distribution. The basis for the sediment transport description is the model for turbulent wave-current boundary layers of Fredsøe (1984). The boundary layer is composed of two regions:

Close to the bed the turbulence and the shear stress in the wave boundary layer vary within the wave period, giving rapidly changing bed concentration and turbulent diffusion coeffi-cients.

Outside the wave boundary layer the mean velocity is described by a log-profile. The increased turbulence level in the wave boundary layer retards the mean current, an effect which is expressed through an apparent wave roughness, k_w, which is larger than the natural bed roughness k.

The total sediment load is split into bed load and suspended load, which are calculated separately. The transport of non-cohesive material as bed load is calculated according to the model presented by Engelund and Fredsøe (1976). Through subsequent developments this model has been extended to cover combined waves and current, and conditions in the surf zone. The bed load transport is determined as a function of the bed shear stress through the dimensionless bed shear stress, θ:

$$\theta = \frac{U_f^{\,2}}{(s-1)\,gd}$$

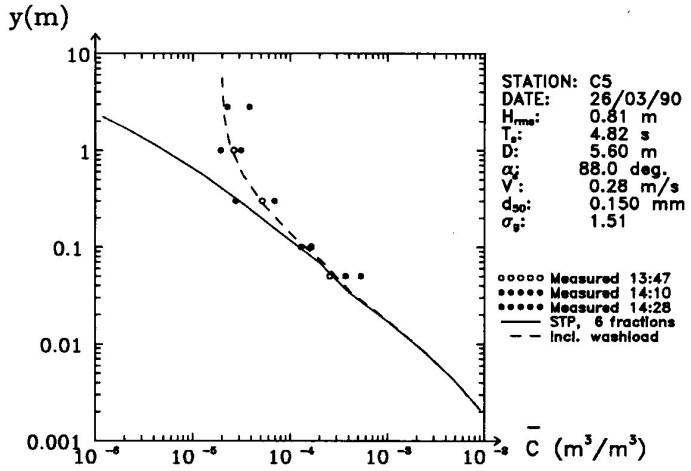
The bed load transport is assumed to correspond to the instantaneous bed shear stress under unsteady conditions, e.g. under wave action.

The suspended load transport, q_s, is described through the sediment concentration C, which is determined from the vertical turbulent diffusion equation:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z}\right] + w\frac{\partial C}{\partial z}$$

ε_s is taken to be equal to the turbulent eddy viscosity of the flow field. The near-bed boundary condition is given as bed concen-tration C_b at the level z = 2d. C_b is determined as a function of θ using the dynamic con-siderations of Bagnold (1954), that a certain sediment concentration is required near the bed in order to transfer the shear stress to the bed through grain-grain interaction.

The bed concentration, C_b, is only valid for the plane bed case, i.e. sheet flow, which is found for θ larger than about 0.8. At smaller θ-values the bed is covered by wave ripples. The sediment transport model by Fredsøe et. al (1985) has been modified to take the effect of wave ripples into account. The modification involves the bed concentration, turbulent diffusion and the bed roughness. The values of C_b and ε are based directly on the laboratory measurements of Nielsen (1979). The rough-ness is expressed through the ripple dimensions as given by Raudkivi (1988). The sediment transport model converges gradually towards a plane bed description with increasing bed shear stress or mean current velocity.



Vertical mean sediment concentration profile calculated by STP, compared to full scale field measurements

Inside the surf zone, the wave energy is dissipated due to breaking, and the production of turbulence is very intense. This has been taken into account by use of a one-equation turbulence model (Deigaard et. al. (1986)).

STP also has the possibility to solve the intra-wave period vertical sediment diffusion equation for asymmetric waves, including the effects of Lagrangian drift, induced streaming and density driven currents. Inside the breaker zone, the undertow profile is also dependent on the shoreward flux of water in the surface roller.

The suspended sediment transport q_s is calculated as the product of sediment concentration and the mean circulation current averaged over the wave period T (Hedegaard et al. (1988)):

$$q_s = \frac{1}{T}\int_0^T \int_{2d}^{D} C\, U_{mean}\, dydt$$

The suspended sediment follows the water, and the sediment transport shall be based on the Lagrangian flow velocity.
U_{mean} is thus taken as the sum of the Eulerian circulation current U and the Lagrangian drift velocity U_D obtained from the flow model.

Symbol List

s	:	relative sediment density
g	:	acceleration of gravity
d	:	grain size
U_f	:	shear velocity
t	:	time
z	:	vertical coordinate (zero at the bed)
ε_s	:	turbulent diffusion coefficient
w	:	settling velocity of the sediment.

Solution Technique

The equations are solved using interpolation and finite difference techniques with time-variables defined on an intra-wave period staggered grid and space-variables defined on a non-equidistant vertical grid.

Input

The following basic input is required in STP:

- Water depth and bed slope
- Wave properties; height, period and angle
- Current velocity and direction
- Sediment properties; size, gradation, fall velocity.

Output

The following output can be obtained from STP:

- Time averaged values of the profiles of eddy viscosity, concentration, velocity and the suspended sediment transport in two directions
- Total bed load and suspended load in two directions
- Time-varying profiles of eddy viscosity, concentration and velocity in two directions
- Time-varying values of bed velocity, friction velocity, Shields parameter and bed concentration.

References

Bagnold, R.A., "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear". Proceeding Royal Society, London (A), 49, 1954.

Deigaard, R., Fredsøe, J. and Hedegaard, I.B. (1986a) "Suspended sediment in the surf zone". J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 1.

Engelund, F. and Fredsøe, J. (1976) "A sediment transport model for straight alluvial channels", Nordic Hydrology, 7.

Fredsøe, J. (1984) "The turbulent boundary layer in combined wave-current motion". J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. HY8.

Fredsøe, J., Andersen, O.H. and Silberg, S. (1985) "Distribution of suspended sediment in large waves", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 6.

Hedegaard, I.B. (1985) "Wave generated ripples and resulting sediment transport in waves". Inst. Hydrodynamics and Hydraulic Engng., Tech. Univ. of Denmark, Ser. Paper 36.

Nielsen, P. (1970) "Some basic concepts of wave sediment transport". Int. Hydrodynamics and Hydraulic Engineering. Tech. Univ. of Denmark. Ser. Paper 20.

Raudkivi, Arved J. (1988) "The roughness heights under waves". J. Hydraulic Research, Vol. 26, No. 5.

Svendsen, I.A., Schäffer, H.A. and Buhr Hansen, J. (1987) "The interaction between the undertow and the boundary layer flow on a beach". J. Geophysical Research Vol. 92, No. C11.

Zyserman, J. and Fredsøe, J. (1988) "The effect of rip-currents on the longshore sediment transport". 2nd Int. Symp. On Wave Research and Coastal Engng., Hannover.

THE LONGSHORE CURRENT AND LITTORAL DRIFT MODULE, LITDRIFT

The LITDRIFT Module combines STP with a coastal hydrodynamic module to give a deterministic description of the littoral drift.

LITDRIFT provides a powerful tool for sediment budget analysis, which is of paramount importance to all coastal morphology studies.

The LITDRIFT Module simulates the cross-shore distribution of wave height, set-up and longshore current for an arbitrary coastal profile. It provides a detailed deterministic description of the cross-shore distribution of the longshore sediment transport for an arbitrary bathymetry for both regular and irregular sea states.

LITDRIFT accounts for:

- Regular/irregular waves
- Water levels
- Tidal currents
- Wind shear stresses
- Non-uniform bottom friction
- Wave refraction and shoaling
- Breaking
- Non-uniform sediment distribution.

LITDRIFT has the possibility to transfer a wave climate from deeper waters to a point in the profile, generating the output as a normal database for input in LITDRIFT or STP.

Application Areas

LITDRIFT can be applied to the study of coastal processes, e.g.:

- Littoral transport distribution
- Bypass of sediments
- Annual drift calculations.

Basic Equations

The hydrodynamic model LITDRIFT includes a description of propagation, shoaling and breaking of waves, calculation of the driving forces due to radiation stress gradients, momentum balance for the cross-shore and longshore direction giving the wave set-up and the longshore current velocities. The model can be applied on complex coastal profiles with longshore bars. In the case of a longshore bar the broken waves can reform in the trough onshore of the bar. The waves can be treated as regular or irregular, and the effect of directional spreading can be included in the description.

It is assumed in the model that the conditions are uniform along the straight coast.

The equation for shore-parallel momentum balance determines the longshore current velocity profile:

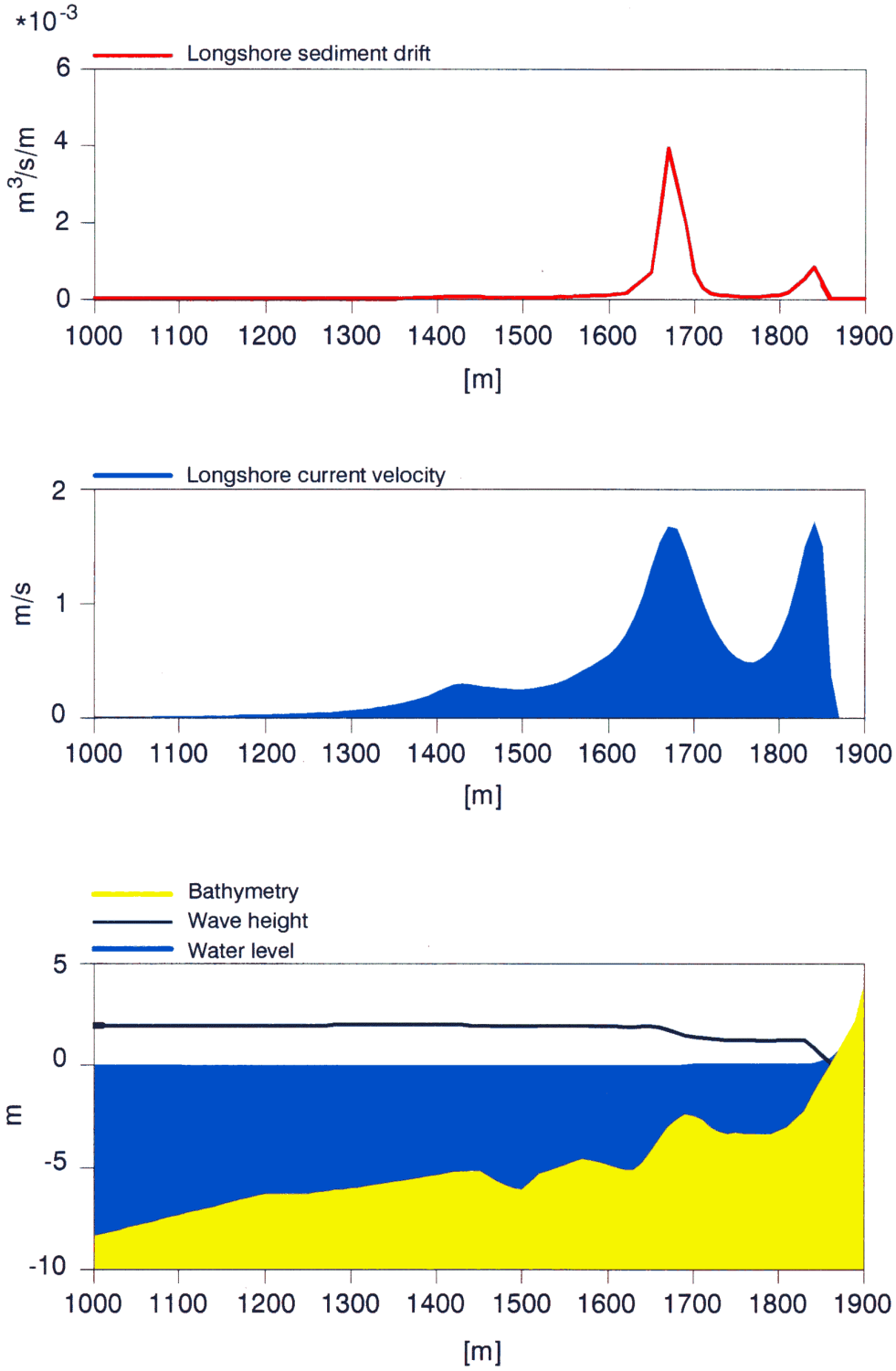
$$\tau_b - \frac{d}{dy}\left[\rho E D \frac{du}{dy}\right] = -\frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur}$$

The relation between u and τ_b is established by the model of Fredsøe (1984).

Having computed the longshore current points are selected which are representative for the littoral drift. The sediment transport calculations automatically carried out by the STP-module, are made to reflect the local conditions with respect to the energy dissipation, the percentage of non-breaking waves and the rms of the wave heights, cf. Deigaard et al. (1988).

The total sediment transport is dominated by transport contributions from areas where wave breaking occurs. The point selection procedure therefore gives preference to points in this area. In case of a bar-profile, the sediment calculation points will thus be located on the bars, where waves are breaking.

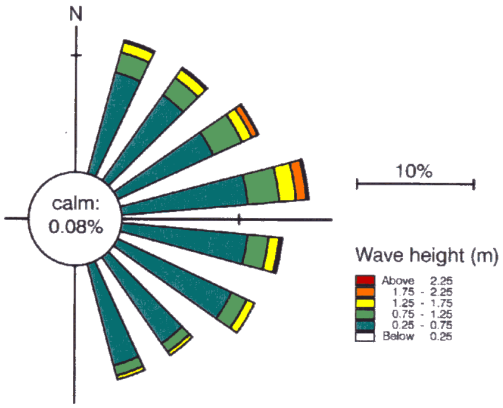
LITDRIFT gives the distribution of sediment transport across the profile, which is integrated



Calculated Sediment Transport, Velocity, Wave Height and Water Level along a Profile

to obtain the total longshore sediment transport rate.

By including a hydrodynamic database, LITDRIFT calculates the net/gross littoral transport for a section of coastline over a specific design period. Important factors, such as the linking of the water level and the profile to the incident sea state are included.



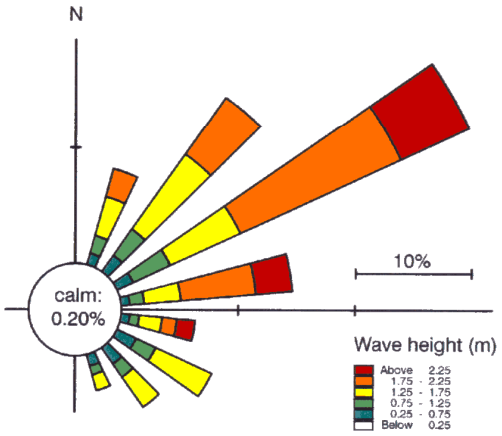
Annual Wave Climate

Symbol List

τ_b : bed shear stress due to the longshore current
ρ : density of water
E : momentum exchange coefficient
D : water depth
u : longshore current velocity
y : shore-normal coordinate
s_{xy} : shear component of the radiation stress
τ_w and
$\tau_{cur.}$: driving forces due to wind and coastal current.

Solution Technique

The equations are solved using finite difference techniques with variables defined on a space-staggered equidistant horizontal grid.



Corresponding Littoral Drift Scaled by Gross Climate

Input

The following basic input is required in LITDRIFT:

- Cross-shore profile bathymetry with the values of bed roughness and grain properties (size, fall- velocity and gradation) given at each grid point
- Water level
- Wave properties; height, period and angle
- Tidal current velocity.

Output

The following output can be obtained from LITDRIFT:

- Cross-shore distribution of water level, longshore current, wave height and wave angle, water flux, bed load and suspended transport, total load and cumulative total load transport
- Cross-shore distribution of total annual littoral drift
- Total net- and gross transport rates.

References

Deigaard, R., Fredsøe, J., Hedegaard, I.B., Zyserman, J.A., Andersen, O.H., (1988) "Littoral Drift Model for Natural Environments", 21st Int. Conf. On Coastal Engng., Málaga.

Foster, T., Mangor, K. and Skou, A. "Controlling Parameters on Littoral Transport and Coastline Development". The 7th Symposium on Coastal and Ocean management, California, July 8-12, 1991.

Foster, T.M. and Skou, A.J. "LITPACK on Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics". 3rd International Software Exhibition for Environmental Science & Engineering, Como, Italy, September 1992.

Skou, A., Hedegaard, I.B., Fredsøe, J., and Deigaard, R. "Applications of Mathematical Models for Coastal Sediment Transport and Coastline Development". Proceedings of COPEDEC III, Mombasa, Kenya, September 16-20, 1991.

THE COASTLINE EVOLUTION MODULE, LITLINE

LITLINE is a powerful and reliable tool for the design and optimisation of many coastal engineering projects.

Based upon the results from LITDRIFT, LITLINE simulates the coastal response to gradients in the longshore sediment transport capacity resulting from natural features and a wide variety of coastal structures.

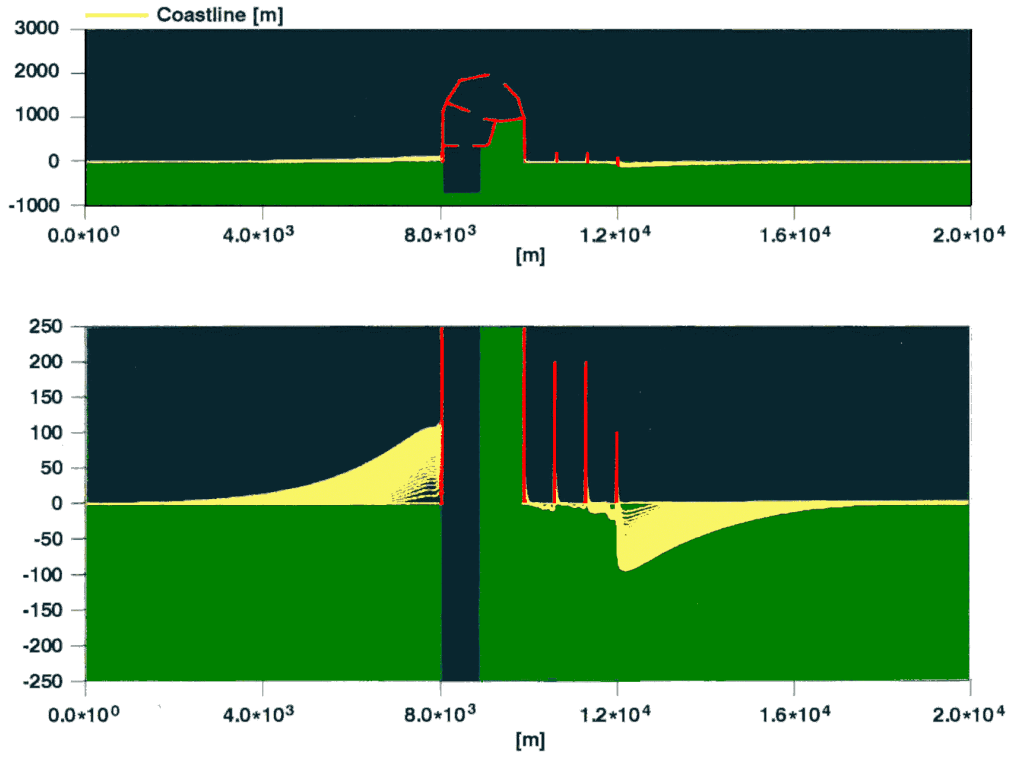
LITLINE calculates the coastline evolution by solving a continuity equation for the sediment in the littoral zone. The influence of structures, sources and sinks are included.

LITLINE accounts for

- Structures (groynes, jetties, revetments and offshore breakwaters)
- Sources and sinks
- Diffraction of waves
- Depth contours
- Active depth and dunes.

Application Areas

The evolution of the coastline can be calculated, either based on a yearly net littoral drift or from a time series of wave events. The latter option offers the capability of studying coastline movements during a winter season (for instance maximum retreat) or coastline changes on a coast with monsoon climate.



Development of coastline near harbour during 30 years
Upper Figure: True scale, Lower Figure: Dissorted scale

Basic Equations

Based upon the results from the LITDRIFT, LITLINE simulates the coastal response to gradients in the longshore sediment transport capacity resulting from natural features and a wide variety of coastal structures.

The model solves the continuity equation for the coastline:

$$\frac{\partial y_c}{\partial t} = -\frac{1}{h_{act}} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{Q_{sou}}{h_{act} \Delta x}$$

The changes to the transport conditions caused by coastal structures are modelled by introducing appropriate internal boundary conditions. Besides blocking the transport, large structures change the transport relations close to the structure due to the sheltering effect from the structure itself. This effect is automatically included by introducing modified transport relations close to the structure.

With jetties and breakwaters the influence of diffraction on the wave climate is included.

Symbol List

y_c : distance from the baseline to the coastline
t : time
h_{act} : height of the active cross-shore profile
Q : long-shore transport of sediment expressed in volumes
x : long-shore position
Δx : long-shore discretization step
Q_{sou} : source/sink term expressed in volume/Δx.

Solution Technique

The equations are solved using finite difference techniques with variables defined on a space-staggered equidistant horizontal grid. The sediment transport rates are found by interpolation in a transport table previously generated for the particular site.

Input

The following basic input is required in LITLINE:

- Longshore relative coastline alignment together with dune properties, profile description, active depth and depth contour angles at each grid point
- Cross-shore profile bathymetries
- Data base with wave properties (wave height, -period and angle), tidal current and water levels
- Position and size of structures
- Position and magnitudes of sources/sinks
- Database of transport rates (previously generated)

Output

The results of the simulation are the coastline position, longshore sediment transport rates and the depth in front of revetments, if they are present. The accumulated volume of material deposited and bypassed is also given.

THE TRENCH SEDIMENTATION MODULE, LITTREN

LITTREN finds applications in areas where the suspended load is not in equilibrium with the local hydrodynamics, for example channel back-filling and intake intrusion problems.

LITTREN accounts for

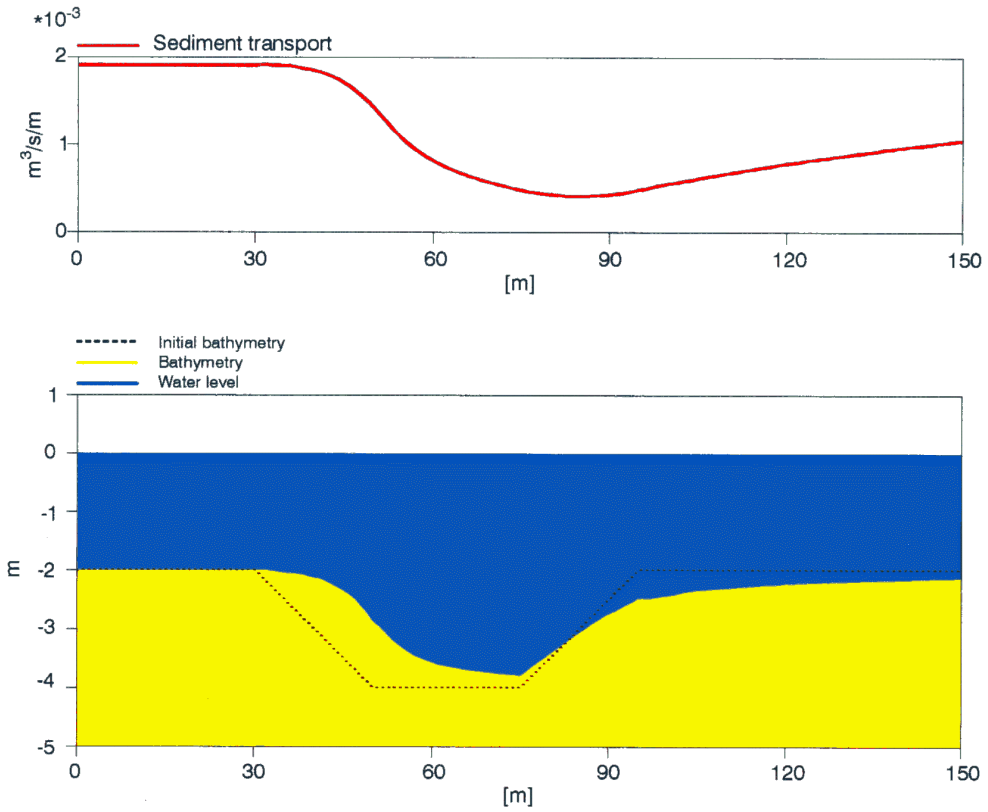
- Non-equilibrium sediment transport in combined waves and currents.
- Full morphological feed back between bed level change, waves, currents and sediment transport.
- Current and wave 'refraction' over the channel.

Basic Equations

Based upon the standard STP formulation, LITTREN links a one-dimensional wave – current model to a non-equilibrium formulation of the vertical sediment diffusion equation.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z}\right) + w\frac{\partial c}{\partial z}$$

Bed load transport and the near bed concentration include gravity effects, which are found to be important. In cases where the channel direction is similar to the persistent current direction, gravity effects are the dominating back-filling mechanism.



Example of Simulated Trench Sediment

The change in bed level is found by the bottom sediment continuity equation:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{(1-n)}\frac{\partial q}{\partial x}$$

Solution Technique

The module includes a morphological subroutine using a modified Lax-Wendroff solution to the bottom sediment continuity equation.

This allows continuous interaction between the morphology and hydrodynamics, thereby avoiding an overly conservative solution based upon initial values.

Input

The following basic input is required in LITTREN:

- Bathymetry profile perpendicular to the trench alignment
- Arbitrary time series of wave/current magnitudes and directions and water levels
- Grain diameter and fall velocity.

Output

The outcome of the simulation is the bathymetry of the trench profile, total change in bed level and total-load transport rates along the trench profile.

List of Symbols

c : concentration of sediment
t : time
ε_s : eddy viscosity
w : sediment fall velocity
z : bed level
n : porosity of the bed
q : sediment flux
x : horizontal coordinate.

THE PROFILE DEVELOPMENT MODULE, LITPROF

LITPROF describes cross-shore profile changes by solving the bottom sediment continuity equation, based on the sediment transport rates calculated by STP.

LITPROF being a time-domain model, includes the effects of changing morphology on the wave climate and transport regime. This enables a simulation of profile development for a time-varying incident wave field.

LITPROF accounts for the following effects:

- Shoaling of waves
- Breaking waves
- Transport, including the effects of undertow, Lagrangrian drift, streaming and bed slope
- Structures (submerged breakwater and/or revetment).

Application Areas

LITPROF can be applied to investigate storm profile development and the response of beach nourishment to storm conditions. Furthermore, a profile envelope for various wave conditions may be obtained forming the basis for estimating burial depths for pipelines.

Basic Equations

A sediment transport table based on STP calculations are used as the basis for the morphological module (Hedegaard et al. (1988), describing the development of the coastal profile. The bed level change is described by the continuity equation for the sediment:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{1}{1-n} \frac{\partial q_s}{\partial x}$$

The boundary condition is that the sediment transport is zero at the coastline.

The morphological model cannot be based directly on the sediment transport rates calculated from the local wave parameters, because it is not physically correct to expect an immediate, local response of the sediment transport to varying hydrodynamic conditions (Roelvink and Stive (1988)). Today no theory exists that can describe the actual cross shore variation of the sediment transport, and a heuristic transformation of the sediment transport calculated from the local conditions has been applied. The transformation reflects that the circulation current does not adjust immediately to the driving forces, but develops gradually. The peak of sediment transport is therefore shifted shorewards relative to the maximum of the driving forces. The transformation, giving the sediment transport, q_{sl}, used for the profile modelling, is expressed as a response function:

$$\frac{\partial q_{sl}}{\partial x} = \frac{q_s - q_{sl}}{L}$$

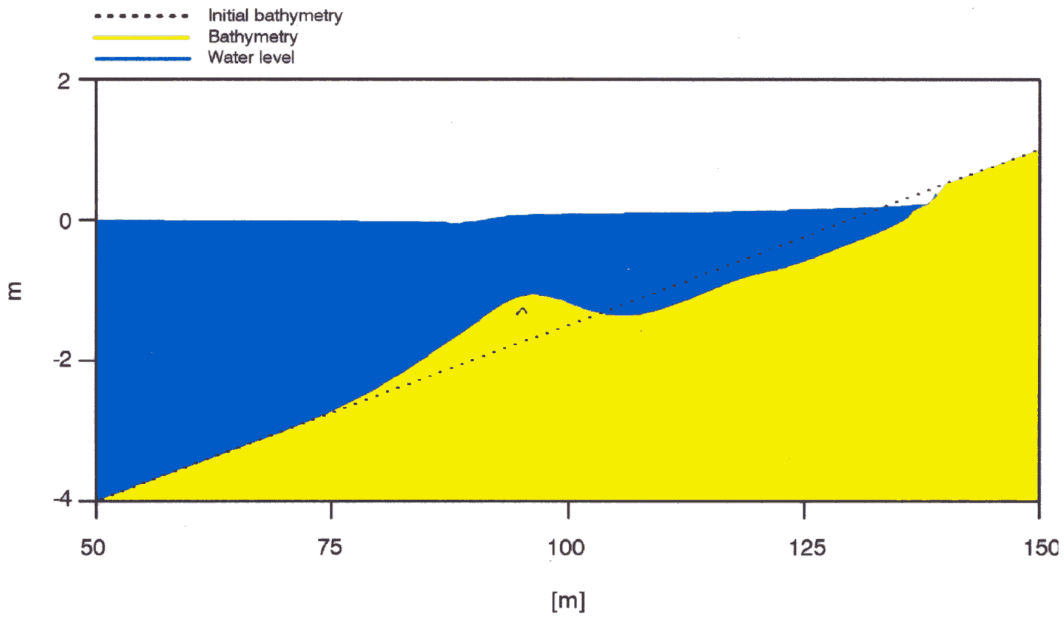
Symbol List

h : bed level
n : porosity of the bed material.

The length scale L is proportional to the local water depth.

Solution Technique

The equations are solved using finite difference techniques with variables defined on a space-staggered equidistant horizontal grid.



Example of Bar Development in Profile

Input

The following basic input is required in LITPROF:

- Cross-shore profile bathymetry
- Arbitrary time-series of wave height and water level
- Data base of transport rates (previously generated).

Output

The main results from LITPROF are

- Profile response to various conditions
- Fate of nourished material
- Profile response to structures
- Profile envelope.

1998-07-09/S:/LITPACK/LITPACK-SHORT.DOC.AJS.kin

References

Hedegaard, I.B., Deigaard, R. (1988) "A model for cross-shore sediment transport and coastal profile development". Proc. IAHR. 2nd Int. Symp. On Wave Research and Coastal Engineering, Hannover.

Roelvink, J.A. and M.J.F. Stive (1988) "Large scale tests of cross-shore sediment transport on the upper shoreface". Proc. IAHR. Symposium on Mathematical Modelling of Sediment Transport in the Coastal Zone, Copenhagen.